



**Уральский  
федеральный  
университет**

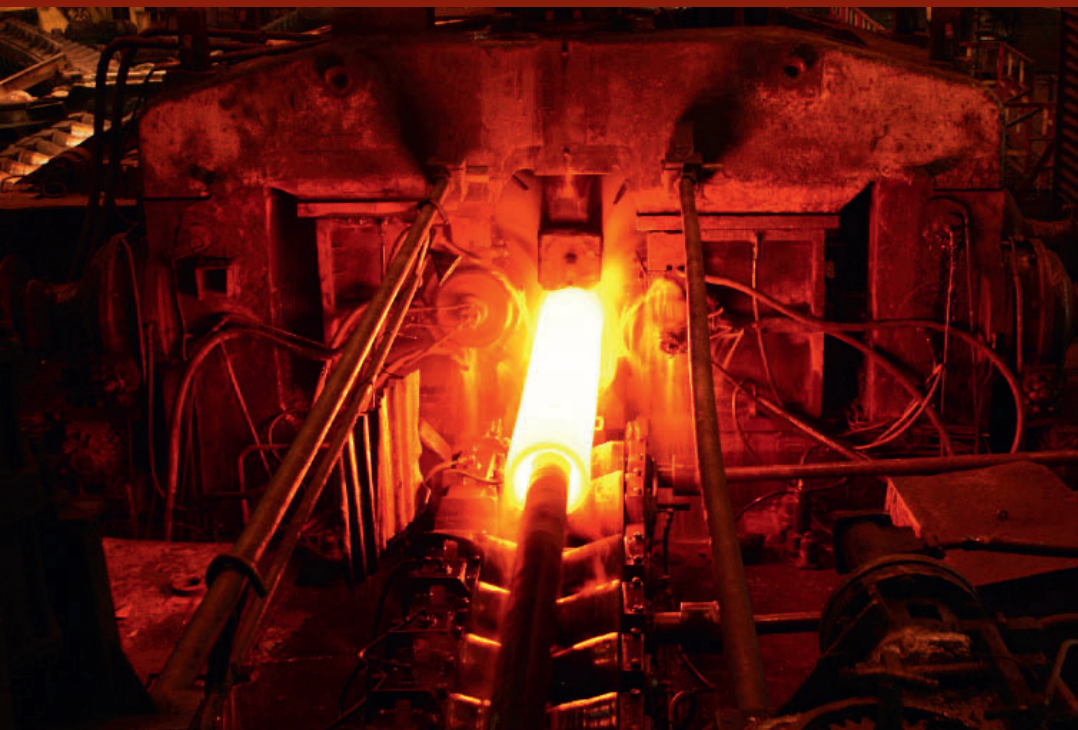
имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

**Институт новых материалов  
и технологий**

**А. А. БОГАТОВ  
Д. А. ПАВЛОВ  
Д. Ш. НУХОВ**

# **ВИНТОВАЯ ПРОКАТКА НЕПРЕРЫВНО-ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАРОК СТАЛИ**

**Учебное пособие**





Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

А. А. Богатов, Д. А. Павлов, Д. Ш. Нухов

# Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали

Рекомендовано методическим советом  
Уральского федерального университета  
в качестве **учебного пособия**  
для студентов вуза, обучающихся по направлениям  
22.03.02; 22.04.02 — Металлургия  
и 22.03.01; 22.04.01 — Материаловедение  
и технологии материалов

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2017

УДК 621.774.353:669.14.018.291-147(075.8)

ББК 34.621.66я73+34.222.23я73

Б73

Рецензенты:

кафедра «Машины и технологии обработки материалов давлением»  
Южно-Уральского государственного университета (завкафедрой — проф.,  
д-р техн. наук В. Г. Шеркунов);

О. С. Лехов, д-р техн. наук, профессор кафедры «Автомобили и подъемно-  
транспортные машины» Российского государственного профессиональ-  
но-педагогического университета

Научный редактор — проф., д-р техн. наук Г. А. Орлов

**Богатов, А. А.**

Б73 Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных  
марок стали : учеб. пособие / А. А. Богатов, Д. А. Павлов, Д. Ш. Нухов. —  
Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 164 с.

ISBN 978-5-7996-2031-8

Предназначено для студентов (бакалавров и магистрантов) и аспирантов,  
обучающихся по направлениям 22.03.02; 22.04.02 — Металлургия и 22.03.01;  
22.04.01 — Материаловедение и технологии материалов.

Библиогр.: 10 назв. Табл. 32. Рис. 115.

УДК 621.774.353:669.14.018.291-147(075.8)

ББК 34.621.66я73+34.222.23я73

ISBN 978-5-7996-2031-8

© Уральский федеральный  
университет, 2017



# Оглавление

---

<b>1. Теоретические основы винтовой прокатки заготовки .....</b>	<b>6</b>
1.1. Геометрия очага деформации.....	6
1.2. Кинематика процесса винтовой прокатки .....	10
1.3. Система ограничений процессов винтовой прокатки и прошивки заготовки .....	15
1.3.1. Условия захвата .....	15
1.3.2. Преждевременное вскрытие полости при винтовой прошивке заготовки.....	18
1.3.3. Скручивание заготовки в валках.....	19
1.4. Способы повышения надежности и стабильности процесса.....	21
<b>2. Компьютерное моделирование процесса винтовой прокатки .....</b>	<b>23</b>
2.1. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением....	23
2.1.1. Развитие конечно-элементного моделирования процессов обработки металлов давлением на основе вариационного принципа механики, предложенного В.Л. Колмогоровым .....	23
2.1.1.1. Шаговая процедура решения краевой задачи ОМД .....	25
2.1.1.2. Структурно-чувствительная модель деформируемого тела ...	26
2.1.1.3. Дополнение алгоритма шаговой процедуры решения краевой задачи ОМД .....	32
2.1.2. Основы работы в программе Deform .....	33
2.1.3. Pre Processor.....	34
2.1.4. Simulator.....	37
2.1.5. Post Processor .....	39
2.2. Деформированное состояние металла при обжатии заготовки в трехвалковом стане винтовой прокатки .....	41
2.2.1. Постановка задачи компьютерного моделирования и планирование вычислительного эксперимента .....	42
2.2.2. Анализ результатов исследования .....	44
2.3. Деформированное состояние металла при винтовой прошивке .....	50
2.3.1. Постановка задачи компьютерного моделирования и планирование вычислительного эксперимента .....	50
2.3.2. Анализ результатов исследования .....	51
2.4. Компьютерное моделирование формоизменения заднего конца заготовки при обжатии и прошивке .....	56
2.4.1. Компьютерное моделирование процесса обжатия заготовки на трехвалковом обжимном стане .....	56
2.4.2. Компьютерное моделирование процесса прошивки.....	59

<b>3. Исследование формоизменения заднего конца заготовки при винтовой прокатке .....</b>	<b>62</b>
3.1. Исследование влияния формы конца заготовки и режимов прокатки на размеры утяжины .....	62
3.1.1. Исследование влияния технологических параметров процесса обжатия на образование утяжин .....	62
3.1.2. Исследование влияния формы конца заготовки на размеры утяжины .....	70
3.1.3. Исследование влияния глубины утяжины на формоизменение гильзы при прошивке .....	73
3.2. Проверка достоверности результатов компьютерного моделирования ..... сопоставлением результатов вычислительного и промышленных экспериментов .....	75
3.3. Физическое моделирование процесса профилирования заднего конца заготовки на трехвалковом обжимном стане.....	83
3.3.1. Рабочий проект устройства для моделирования процесса профилирования заднего конца заготовки на трехвалковом обжимном стане .....	83
3.3.2. Планирование физического эксперимента.....	86
3.3.3. Анализ результатов модельного эксперимента.....	88
3.4. Компьютерное моделирование процесса профилирования заднего конца заготовки на трехвалковом обжимном стане.....	89
3.4.1. Компьютерное моделирование процесса профилирования конца заготовки в программном комплексе DEFORM-3D .....	90
3.4.2. Влияние температурных полей на формоизменение концевой части заготовки.....	95
<b>4. Оборудование и настройка станов винтовой прокатки .....</b>	<b>98</b>
4.1. Оборудование и настройка трехвалкового стана винтовой прокатки .....	98
4.1.1. Назначение и область применения .....	98
4.1.2. Описание оборудования участка обжимного стана .....	99
4.1.3. Описание работы обжимного стана .....	104
4.1.4. Настройка обжимного стана и его эксплуатация .....	106
4.2. Реконструкция оборудования входной стороны трехвалкового обжимного стана на основе результатов компьютерного моделирования и промышленных экспериментов .....	107
4.2.1. Участок входной стороны трехвалкового обжимного стана .....	107
4.2.2. Техническое задание на реконструкцию входной стороны обжимного стана ТПА-80.....	109
4.2.3. Компоновка основных узлов входного стола обжимного стана по предлагаемому варианту реконструкции .....	111
4.2.4. Кинематический расчет процесса профилирования заднего конца заготовки.....	112
4.2.5. Реконструкция вталкивателя заготовки.....	113
4.2.6. Реконструкция желоба входной стороны обжимного стана .....	114
4.2.7. Реконструкция входной проводки .....	115

4.2.8. Описание процесса прокатки заготовки в трехвалковом обжимном стане .....	116
4.3. Оборудование и настройка прошивного стана.....	118
4.3.1. Состав оборудования прошивного стана .....	118
4.3.2. Описание работы стана.....	124
4.3.3. Настройка прошивного стана.....	124
<b>5. Способы изготовления непрерывно-литой заготовки .....</b>	<b>130</b>
5.1. Конверторный способ производства стали .....	130
5.2. Технологическая схема электросталеплавильного способа производства стали и непрерывно-литых заготовок.....	134
<b>6. Повышение качества стали, непрерывно-литых заготовок и труб .....</b>	<b>139</b>
6.1. Освоение технологии внепечной обработки стали .....	139
6.2. Повышение качества непрерывно-литой заготовки .....	143
6.2.1. Исследование образования трещин в осевой зоне слитка.....	143
6.2.2. Технические решения по уменьшению вторичного окисления стали на МНЛЗ.....	145
6.3. Исследование процесса формирования структуры и механических свойств при винтовой прокатке .....	146
6.3.1. Структура высокопрочной стали 03X11 H10.....	146
6.3.2. Влияние предварительного обжата непрерывно-литой заготовки на зеренную структуру .....	148
6.4. Результаты освоения производства непрерывно-литой заготовки на ОАО «Первоуральский новотрубный завод». Оценка качества труб.....	150
6.5. Исследование влияния технологических режимов прошивки на образование дефектов на поверхности труб и уровень брака продукции .....	153
6.5.1. Оценка влияния типа трубопрокатного агрегата на качество поверхности труб.....	156
6.5.2. Анализ влияния способов и режимов прокатки на ТПА на образование наружных дефектов.....	157
Список библиографических ссылок .....	163

# 1. Теоретические основы винтовой прокатки заготовки\*

---

## 1.1. Геометрия очага деформации

---

**А**нализ известных технологических схем производства горячекатаных труб показывает, что определяющим как с точки зрения повышения производительности, так и формирования качества продукции, является процесс винтовой прокатки [1–10]. При винтовой прокатке движение деформируемой заготовки происходит под действием сил трения на поверхности контакта металла с валками. Заготовка совершает поступательное и вращательное движение. Винтовое движение заготовки обеспечивается при наклоне осей рабочих валков относительно оси заготовки и одинаковом направлении вращения рабочих валков. Обжатие заготовки происходит вследствие того, что в конусе захвата расстояние между рабочими поверхностями валков в осевом направлении движения заготовки уменьшается, однако в конусе раскатки это расстояние увеличивается, а обжатие характеризуется введением в очаг деформации оправки.

Винтовая прошивка — это процесс формоизменения сплошной в исходном состоянии заготовки в полую гильзу при прокатке. В дальнейшем гильза подвергается раскатке на оправке различными способами и в результате получают черновую трубу, а после горячей отделки (обкатка, редуцирование, калибровка) получают чистовую трубу. На практике применяются преимущественно литые, катаные и кованные заготовки цилиндрической формы. Процесс винтовой прошивки является наиболее распространенным при производстве горячекатаных труб. Он менее затратный по сравнению с прессовой и пресс-валковой прошивкой и обеспечивает получение длинномерных и тонкостенных гильз. Точность размеров гильз, полученных вин-

---

\* Выполнено совместно с В. А. Топоровым.

товой прошивкой, также выше, чем при прессовой и пресс-валковой прошивке.

Очаг деформации при винтовой прокатке деформируемой заготовки определяется взаиморасположением и движением инструмента деформации: валки, линейки (направляющий инструмент) и оправка. По форме валков станы винтовой прокатки подразделяются на четыре типа (рис. 1.1): с бочковидными, грибовидными, чашевидными и дисковыми валками.

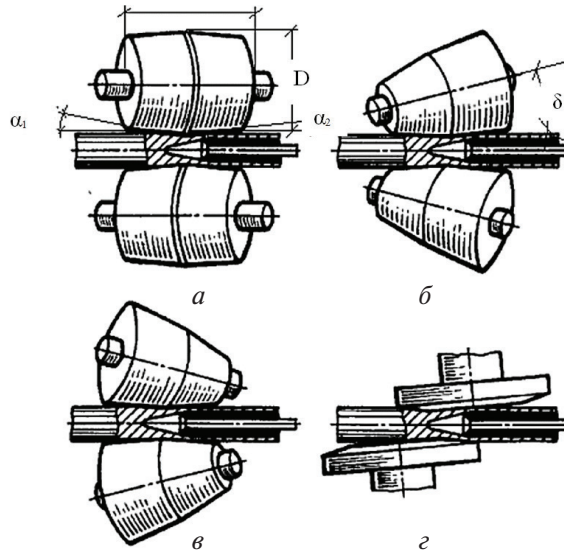


Рис. 1.1. Схемы прокатки:

а — бочковидными, б — грибовидными, в — чашевидными валками;  
г — дисковыми валками

Размеры валков характеризуются диаметром ( $D$ ) и длиной ( $L$ ) бочки валка, углами наклона образующих входного ( $\alpha_1$ ) и выходного конусов ( $\alpha_2$ ) относительно оси валка (рис. 1.1, а). В некоторых случаях применяется многоконусная бочка валка. Ось валка относительно оси прошивки в горизонтальной плоскости наклонена под углом раскатки  $\delta$  (рис. 1.1, б), а в вертикальной плоскости под углом подачи —  $\beta$ . Для бочковидных валков  $\delta = 0$ , грибовидных  $\delta = 7-10^\circ$ , для чашевидных  $\delta = - (9-11^\circ)$ . Угол подачи  $\beta$  настраивается на значение в диапазоне  $(7-16^\circ)$ .

Схемы очага деформации с использованием направляющего инструмента различного типа представлены на рис. 1.2.

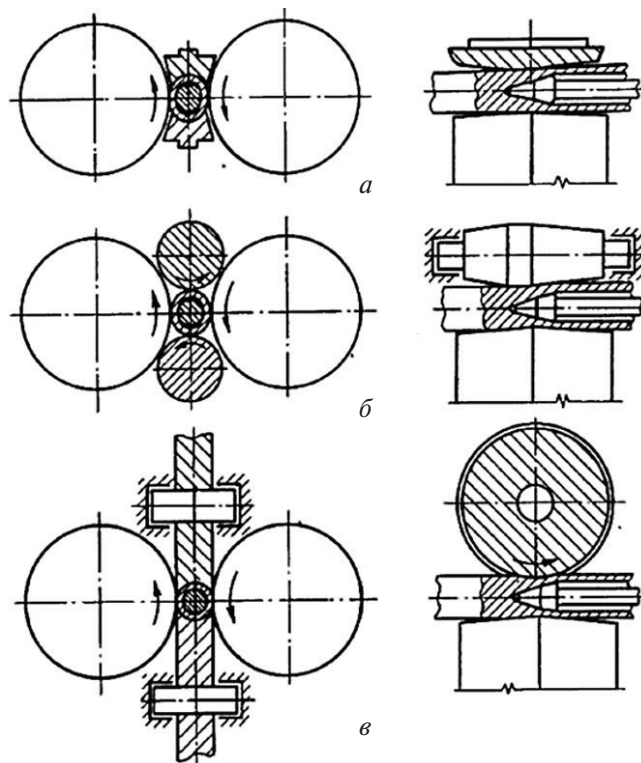


Рис. 1.2. Схемы очагов деформации с различными видами направляющего инструмента:

*a* — линейки, *б* — ролики, *в* — диски

Наиболее распространенным направляющим инструментом являются линейки, расположенные в вертикальной плоскости вместе с механизмом настройки расстояния между ними (рис. 1.2, *a*). Вместо линеек могут применяться направляющие ролики (рис. 1.2, *б*). Известны компоновки инструмента деформации с расположением валков в вертикальной плоскости и расположением направляющих приводных дисков в горизонтальной плоскости (рис. 1.2, *в*) [8]. Направляющий инструмент совместно с валками удерживает заготовку и гильзу в очаге деформации строго по оси прокатки.

Используемые при прошивке оправки могут быть подразделены на три вида: сферические, дуговые, конические (см. рис. 1.3). Наиболее распространенными среди них являются оправки со сферическим профилем (см. рис. 1.3, *a*) [5–7].

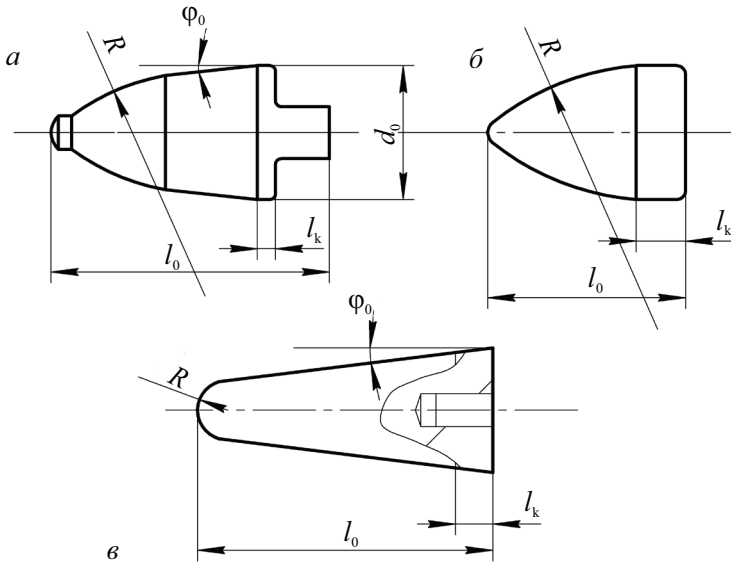


Рис. 1.3. Виды оправок прошивного стана с различным профилем:  
а — сферическим, б — дуговым, в — коническим

Кроме того, оправки различают водоохлаждаемые и без принудительного охлаждения.

Процесс прошивки характеризуется силовыми и тепловыми условиями взаимодействия заготовки и инструмента деформации. В общем случае по длине очага деформации можно выделить семь участков со специфическими силовыми и тепловыми условиями эксплуатации инструмента [7]. Расположение характерных точек и соответствующих участков очага деформации определяются условиями первичного и вторичного захвата заготовки, стационарного протекания процесса прошивки, его начала и окончания (см. рис. 1.4).

На участке касания заготовки с валком от точки 1 до точки 2 заготовка может свободно овализироваться. От точки 2 до точки 3 овализация приобретает упорядоченный характер, определяемый калибровкой валков и линеек, а также технологическими режимами процесса прошивки. Наиболее интенсивная деформация происходит на участке от точки 3 до точки 4. На калибрующем участке оправки от точки 4 до точки 6 деформационные, силовые и тепловые характеристики процесса уменьшаются. Точки 5, 6, 7 и 8 определяют границы участков, на которых происходит отрыв поверхности гильзы от оправки, направляющих линеек и валков.

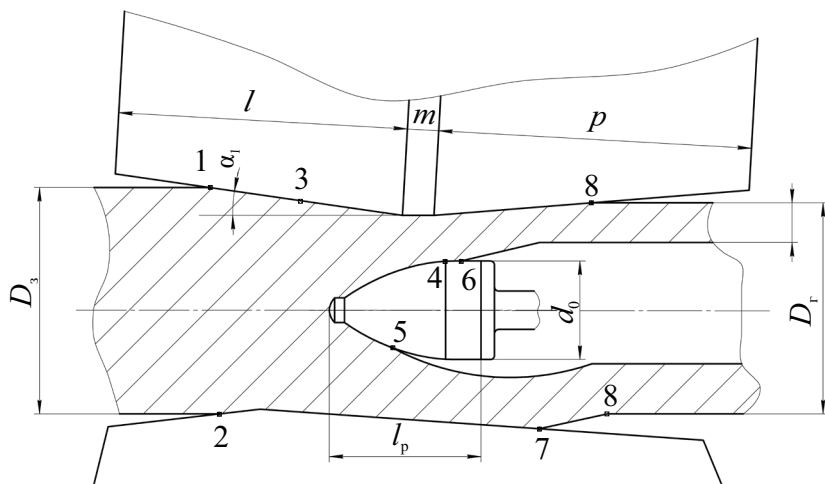


Рис. 1.4. Характерные зоны очага деформации прошивного стана

Следует отметить весьма сложный характер напряжений трения и скольжения металла на поверхности валков, направляющего инструмента и прошивной оправки, которые зависят от калибровки технологического инструмента и скорости вращения валков. Настройка инструмента деформации и его калибровка, а также точность подачи заготовки и выдачи гильзы из очага деформации оказывают влияние на качество гильзы: точность размеров и наличие дефектов на внутренней и наружной поверхности гильзы [8].

## 1.2. Кинематика процесса винтовой прокатки

При винтовой прокатке одновременно происходит вращение и перемещение заготовки в осевом направлении, а также радиальное обжатие ее валками. При винтовой прокатке перемещение заготовки характеризуется осевой  $u$  и тангенциальной  $v$  составляющими вектора скорости. Величины этих скоростей отличаются от соответствующих составляющих  $u'$  и  $v'$  скорости валков. Отношение фактической скорости металла в осевом направлении к соответствующей составляющей скорости валков называют коэффициентом осевого скольжения  $\eta_0$ , а отношение тангенциальной составляющей скорости вращения заготовки к соответствующей составляющей скорости валков называ-



ют коэффициентом тангенциального скольжения  $\eta_T$ , тогда  $u = \eta_0 u'$ ,  $v = \eta_T v'$ . На рис. 1.5 представлена схема скоростей металла и валка при поперечной прокатке: угловые скорости валка  $w_B$  и заготовки  $w_3$ , тангенциальные составляющие скорости валка и скорости заготовки в точке А равны  $v' = \frac{\pi R n_B}{30}$  и  $v = \frac{\pi R n_3}{30}$  соответственно, где  $n_B$ ,  $n_3$ ,  $R$  и  $r_3$  — число оборотов вращения и радиусы валка и заготовки; положение точки А на контактной поверхности определено радиус-вектором  $r_x$ .

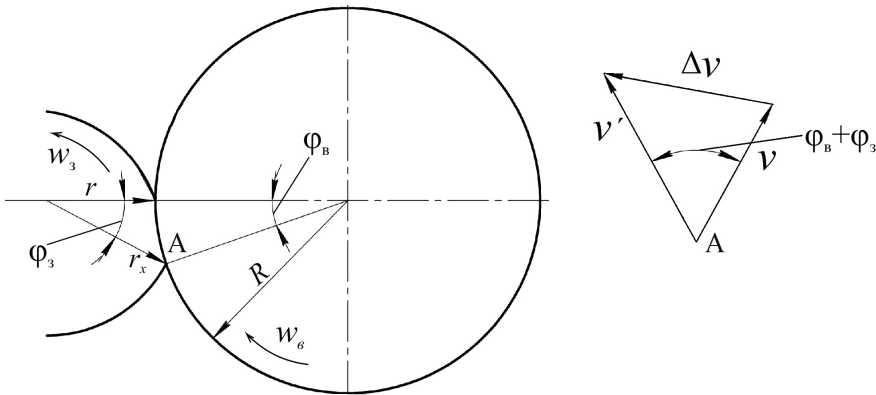


Рис. 1.5. Схема скоростей в тангенциальном направлении

Вектор  $\Delta v = (v' - v)$  характеризует скорость скольжения металла в тангенциальном направлении. Если  $\Delta v > 0$ , то имеет место отставание металла от валка, а если  $\Delta v < 0$  — опережение. Полагая, что углы подачи и раскатки при винтовой прокатке малы, можно утверждать, что рассмотренная диаграмма скоростей, характерная для поперечной прокатки, достаточно точно описывает течение металла и при винтовой прокатке. Определив положение точки А угловыми координатами  $\varphi_B$  и  $\varphi_3$ , найдем тангенциальные составляющие скорости валка и металла

$$v'_x = \frac{\pi R n_B}{30} \cos(\varphi_B + \varphi_3),$$

$$v_x = \frac{\pi r_x n_3}{30}.$$

Коэффициент тангенциального скольжения определим по следующей формуле:

$$\eta_T = \frac{r'_x n_3}{n_B R \cos(\varphi_B + \varphi_3)}. \quad (1.1)$$

По-видимому, на контактной поверхности есть точка, положение которой определено радиусом  $r'$ , в которой тангенциальные составляющие скорости заготовки и валка равны. Для этой критической точки коэффициент тангенциального скольжения равен единице:

$$\frac{r'_x n_3}{n_B R \cos(\varphi'_B + \varphi'_3)} = 1. \quad (1.2)$$

Будем полагать, что все точки заготовки вращаются с одинаковой угловой скоростью ( $\omega_3 = \text{const}$ ), т. е. совершают  $n_3$  оборотов в минуту. Таким образом, пренебрегаем влиянием поля скоростей пластической деформации на значение вектора скорости  $v$ . Решая совместно уравнения (1.1) и (1.2), получаем

$$\eta_T = \frac{r'_x \cos(\varphi'_B + \varphi'_3)}{r' \cos(\varphi_B + \varphi_3)}.$$

Используя уравнения

$$R \cos \varphi_B + r'_x \cos \varphi_3 = R + r'_x,$$

$$R \sin \varphi_B = r'_x \sin \varphi_3$$

и аналогичные уравнения для критической точки, получим окончательно:

$$\eta_T = \frac{1}{\frac{2+i}{(1+i)\cos\varphi'_B - 1} - \frac{2}{i}} \left[ \frac{2+i}{(1+i)\cos\varphi_B - 1} - \frac{2}{i} \right],$$

где  $i = \frac{r}{R}$ .

Эта зависимость впервые была получена П. К. Тетериным, который обратил внимание на тот факт, что в выходном сечении, когда  $\varphi_B = 0$ , коэффициент тангенциального скольжения  $\eta_T < 1$ , а на входе —  $\eta_T > 1$ . Это означает, что при поперечной прокатке имеются зоны отставания и опережения, но в отличие от продольной прокатки их расположение иное: на входе в очаг деформации имеет место зона опережения, а при выходе из валков — зона отставания.

При винтовой прокатке в каждом сечении, перпендикулярном оси прокатки, величина коэффициента тангенциального скольжения нео-

динакова. В этой связи представляет интерес исследование изменения коэффициента вдоль очага деформации. Согласно исследованиям, выполненным О. А. Пляцковским, на большей части очага деформации в тангенциальном направлении имеет место отставание металла от валков ( $\eta_T < 1$ ), и лишь на входном участке очага деформации имеется зона опережения, где  $\eta_T > 1$ . Протяженность этой зоны — 10–20 %. Таким образом, по длине очага деформации имеется нейтральное сечение, где скорость заготовки и валка одинакова. В экспериментах С. П. Грановского отмечены два нейтральных сечения: первое — между входным и выходным сечением очага деформации, второе — нейтральное сечение — расположено вблизи выхода металла из очага деформации. Следует отметить, что во всех экспериментах полученные коэффициенты тангенциального скольжения имеют значения, близкие к единице,  $\eta_T = 0,97–0,98$ , а в зоне опережения в тангенциальном направлении  $\eta_T = 1,02–1,04$ .

Осевая составляющая скорости валков сравнительно мало изменяется по длине очага деформации — в основном пропорционально радиусу валка — и зависит от угла подачи. Заготовка при прошивке претерпевает значительную деформацию (коэффициент вытяжки при прошивке достигает 3,0–4,5), при этом увеличивается осевая составляющая скорости металла. Несоответствие скорости металла и валков вызывает осевое скольжение. Коэффициент осевого  $\eta_0$  скольжения может быть больше или меньше единицы. Это означает, что в осевом направлении также может быть как зона отставания, так и зона опережения [5].

Устойчивое протекание процесса с осевым отставанием металла по всей контактной поверхности объясняется наличием резерва сил трения в тангенциальном направлении. Обычно коэффициент осевого скольжения определяют для сечения выхода, а по его величине судят о производительности процесса. При прошивке в станах с бочковидными валками  $\eta_0 = 0,5–0,9$ ; в станах с грибовидными валками —  $\eta_0 = 0,8–0,95$ . Исследования П. К. Тетерина показали, что при прошивке в трехвалковых станах коэффициент осевого скольжения больше, чем в двухвалковых (на 15–20 %). Многочисленными исследованиями [1–10] на качественном уровне установлено влияние различных технологических факторов на величину коэффициента осевого скольжения. Увеличение коэффициента вытяжки при прошивке вызывает увеличение коэффициента осевого скольжения. Увеличение скорости про-

шивки до некоторого значения ( $\sim 0,35$  м/с) незначительно повышает значение коэффициента осевого скольжения, а при дальнейшем увеличении скорости приводит к его снижению. Увеличение числа оборотов валков обычно снижает значение коэффициента осевого скольжения. Увеличение угла подачи приводит к снижению коэффициента осевого скольжения. Значительное влияние на коэффициент осевого скольжения оказывают размеры прокатываемой заготовки. Чем больше диаметр заготовки, тем меньше коэффициент осевого скольжения. На осевое скольжение влияет состояние поверхности валков и заготовки. При гладкой (заполированной) поверхности валков  $\eta_0$  уменьшается, а при наличии на поверхности заготовки окалина  $\eta_0$  увеличивается. С понижением температуры повышается коэффициент трения, но при прошивке коэффициент осевого скольжения не увеличивается, а, наоборот, из-за роста сопротивления оправки осевому продвижению металла  $\eta_0$  увеличивается. В литературе имеются многочисленные экспериментальные данные исследования коэффициента осевого скольжения, однако количественная оценка влияния технологических факторов на коэффициент осевого скольжения отсутствует. Для расчета коэффициента осевого скольжения при прошивке Ю. М. Матвеев рекомендует использовать эмпирические зависимости, которые могут служить лишь для ориентировочных расчетов:

- при прошивке слитков

$$\eta_0 = 0,75 + 0,01 \cdot \varepsilon - 0,008 \cdot \beta \cdot \sqrt{d_c - 300};$$

- при прошивке заготовок

$$\eta_0 = \frac{3,2}{v'} + 0,005 \cdot \varepsilon + (0,025 - 0,000135 \cdot d_3) \cdot \beta,$$

где  $\varepsilon = \frac{d_3 - d}{d}$  или  $\varepsilon = \frac{d_c - d}{d_c}$  — относительное обжатие заготовки или слитка;  $d_c$ ,  $d_3$  — диаметры слитка или заготовки, мм;  $v'$  — окружная скорость валков, мм/с. Пляцковский О. А. рекомендует формулу расчета коэффициента осевого скольжения для прошивного стана, учитывающую влияние других технологических факторов:

$$\eta_0 = 0,68(\ln \beta + 0,05 \frac{d}{\delta_n} \varepsilon_0) f \sqrt{k}, \quad (1.3)$$

где  $d$  — диаметр прокатываемой гильзы;  $\delta_n$  — диаметр оправки;  $f$  — коэффициент трения;  $k$  — число валков;  $\varepsilon_0$  — обжатие заготовки по диаметру перед оправкой.

### 1.3. Система ограничений процессов винтовой прокатки и прошивки заготовки

#### 1.3.1. Условия захвата

При винтовой прокатке различают первичный захват, когда заготовка первоначально касается валков и получает вращательное и поступательное движение, а также вторичный захват — с момента соприкосновения заготовки с оправкой до момента выхода переднего конца гильзы из валков. Первичный захват произойдет, если будет обеспечено условие вращения заготовки и затем условие осевого втягивания. Условие вращения заготовки можно выразить уравнением

$$M_{\text{в}} \geq M_{\text{п}} + M_{\tau} + M_i, \quad (1.4)$$

где  $M_{\text{в}}$  — суммарный момент вращения заготовки, или момент сил трения;  $M_{\text{п}}$  — суммарный момент сопротивления вращения заготовки, или момент составляющей нормальной равнодействующей сил на контактной поверхности;  $M_{\tau}$  — момент сопротивления сил трения, возникающих на заднем торце заготовки от внешнего осевого усилия толкателя;  $M_i$  — момент сил инерции заготовки относительно ее оси. Рассматривая это условие, П. К. Тетерин получил следующую зависимость [6]:

$$\sqrt{\text{tg}^2(\varphi - \alpha_1) + \frac{\pi}{2}(1+i)\text{tg}(\varphi - \alpha_1)\text{tg}\beta} \leq f, \quad (1.5)$$

где  $\alpha_1$  — угол входного конуса валка;  $f$  — коэффициент трения;  $i = \frac{r_3}{R}$  — отношение радиуса заготовки к радиусу валка;  $\beta$  — угол подачи;  $\varphi$  — угол раскатки.

Известно, что условие вращения заготовки при винтовой прокатке обеспечивается достаточно надежно лишь на станах, прошивающих крупные слитки, когда отношение радиуса слитка к радиусу валка максимальное, а угловая скорость валка минимальная, в противном случае наблюдается пробуксовка [5], предотвратить которую можно конструктивным изменением выходного конуса валка.

Условие осевого втягивания определяется соотношением коэффициентов осевого  $\eta_0$  и тангенциального  $\eta_{\text{т}}$  скольжения. П. К. Тетериным было отмечено, что чем меньше коэффициент осевого скольжения

и больше коэффициент тангенциального скольжения, тем надежнее осуществляется захват заготовки. Условия осевого втягивания выражаются зависимостью [6]:

$$\frac{1-\eta_o}{1-\eta_r} \geq \frac{\operatorname{ctg} \beta}{\sqrt{\left(\frac{f}{\sin \alpha_1 \cos \beta}\right)^2 - 1}}. \quad (1.6)$$

Анализ этой формулы подтверждает, что осевое втягивание может наступить только после начала вращения заготовки. Условия вращения (1.5) и втягивания заготовки (1.6) показывают, что захват лучшим образом обеспечивается при меньших углах конусности валка  $\alpha_1$ . Увеличение угла подачи  $\beta$  улучшает осевое втягивание, но затрудняет вращение заготовки. Совместное рассмотрение условий первичного захвата в осевом и тангенциальном направлениях позволило П. К. Тетерину получить следующую зависимость [6]:

$$\frac{b}{d} \geq \frac{\sqrt{f^2 - \sin^2 \alpha_1}}{1+i}, \quad (1.7)$$

где  $b$  — средняя ширина участка контакта заготовки с валком;  $d$  — диаметр заготовки.

Зависимость (1.7) показывает, что захват заготовки зависит от коэффициента трения, угла конусности входного участка валка и отношения диаметра заготовки к диаметру валка. С увеличением  $f$  и  $i$ , уменьшением  $\alpha_1$  улучшается захват заготовки при винтовой прокатке.

Вторичный захват начинается с момента касания заготовки с оправкой до момента выхода переднего конца трубы из валков. Оправка создает осевое сопротивление продольному продвижению заготовки. Вторичный захват осуществляется, если суммарное втягивающее усилие в очаге деформации превысит силу сопротивления оправки движению заготовки в осевом направлении. Надежность вторичного захвата предложено определять величиной обжатия заготовки перед носиком оправки  $\varepsilon_0$ . Минимальное обжатие перед оправкой, необходимое для преодоления осевого сопротивления последней, определится из условия равновесия заготовки в осевом и тангенциальном направлениях [5]. П. К. Тетериным для определения минимального обжатия перед носком оправки была выведена формула [6]:

$$\varepsilon_{\min} = \frac{\pi \frac{p'}{p} \left( \frac{\delta'_n}{\delta_n} \right)^2}{\left[ k \sqrt{l^2 - \frac{\pi}{2} (1+i) \frac{\eta_o}{\eta_r} \operatorname{tg} \alpha_1 \operatorname{tg} \beta - \sin \alpha_1} \right] \sqrt{\frac{2\pi \cdot \operatorname{tg} \beta}{1+i \cdot \operatorname{tg} \alpha_1} \frac{\eta_o}{\eta_r}}}, \quad (1.8)$$

где  $p, p'$  — среднее удельное давление металла соответственно на валок и на носок оправки;  $\delta'_n$  — диаметр носка оправки;  $k$  — число рабочих валков;  $\delta_n$  — диаметр оправки. Воспользоваться выражением (1.8) для практических расчетов невозможно, поскольку отношение  $\frac{p'}{p}$  обычно неизвестно. Для сопоставления условий захвата в двух- и трехвалковых станах соотношение  $\frac{p'}{p}$  было экспериментально уста-

новлено и составило 0,79 и 0,83 соответственно [6]. Таким образом, исследования, выполненные в работе [6], показали, что вторичный захват в трехвалковом стане более надежный, чем в двухвалковом стане. Согласно исследованиям, проведенным В. С. Смирновым, захват заготовки должен улучшаться с увеличением угла подачи. Это, однако, не соответствует результатам промышленного эксперимента [5]. На условие вторичного захвата оказывает влияние отношение диаметров заготовки и валков. При увеличении этого соотношения минимальное обжатие, необходимое для осуществления захвата, повышается.

В промышленных условиях величину обжатия заготовки перед носком оправки устанавливают в пределах 5–8 % для станков с бочковидными валками и 9–11 % для станков с грибовидными валками. А. М. Звягинцев и А. З. Глейберг рекомендуют определять величину обжатия перед носком оправки по эмпирической формуле:

$$\varepsilon_0 = \left[ (100 - 0,17R) \frac{d_3^2 \delta_n}{(\delta_n + 2 \cdot S_r)^3} + 0,087R - 36 \right] \sqrt{\operatorname{tg} \alpha_1}, \quad (1.9)$$

где  $R$  — радиус валка;  $S_r$  — толщина стенки гильзы.

### 1.3.2. Преждевременное вскрытие полости при винтовой прошивке заготовки

Винтовая прошивка является одним из наиболее сложных процессов обработки металлов давлением с неопределенными граничными условиями и цикличным характером деформации. Пока нет примеров точного расчета температуры, напряжений и деформации в объеме заготовки и во времени для различных материальных частиц заготовки. Процесс протекает со значительным контактным скольжением металла по валкам, линейкам и оправке и сопровождается скручиванием трубы. Отличительной особенностью процесса является то, что пластические зоны очага деформации соседствуют с зонами, находящимися в упругопластическом состоянии. В осевой зоне очага деформации возникает знакопеременная деформация и из-за положительного значения показателя напряженного состояния  $\left(\frac{\sigma}{T} > 0\right)$  снижается пластичность металла.

Показатель Лоде  $\mu_\sigma$  близок к нулевому значению, т. к. в конусе захвата имеет место плоская деформация. В некоторых случаях в осевой зоне заготовки образуются трещины, которые на внутренней поверхности гильз раскатываются в плены. Этому способствует преждевременное вскрытие центральной полости, а разрушение металла связывают с критическим обжатием, значение которого находят для различных марок стали опытным путем [1–10]. Несоблюдение условия обжатия перед носиком оправки меньше критического значения приводит к преждевременному вскрытию полости в заготовке при ее прошивке и является причиной получения труб с дефектами на внутренней поверхности преимущественно в виде плены [1–10]. В настоящее время нет единого взгляда на причины вскрытия полости. Различные гипотезы высказываются как по схеме напряженного состояния (знаки и соотношения радиальных, тангенциальных и осевых напряжений), так и по механизму разрушения (хрупкое или вязкое разрушение) [1–10].

Критическое обжатие зависит от химического состава, структуры стали и температуры деформации. Вскрытие полости при прошивке происходит тем легче, чем меньше величина частного обжатия за полюборот заготовки. Это связано с тем, что с повышением частных обжатий уменьшается неравномерность деформации и показатель напряженного состояния  $\frac{\sigma}{T}$ . Увеличение овализации заготовки приво-



дит к более раннему вскрытию полости [5]. При прокатке заготовок в трехвалковых станах поперечная деформация ограничена, поэтому критическое обжатие больше, чем при прокатке в двухвалковых станах [4]. Применение трехвалковых станов позволяет создать в очаге деформации более равномерное деформированное состояние, а значит, такие станы имеют преимущество перед двухвалковыми с точки зрения повышения критического обжатия.

Исследования, результаты которых получены в промышленных условиях и представлены в работе [9], показали, что повышение критического обжатия может быть достигнуто путем увеличения угла подачи и сокращения числа циклов обжатия заготовки. Можно утверждать, что все мероприятия, направленные на снижение осевого скольжения и уменьшение цикличности деформации, приводят к повышению критического обжатия [5]. Влияние угла раскатки на критическое обжатие изучено недостаточно. При прошивке в стане с грибовидными валками снижается вероятность вскрытия полости. Но при прошивке в чашевидных валках с отрицательным углом раскатки также отмечено снижение вероятности преждевременного вскрытия полости [5]. Большое влияние на вскрытие полости оказывает температура деформации. С ее понижением критическое обжатие уменьшается. Для легированных и высоколегированных сталей оптимальная температура прошивки имеет весьма узкий интервал. Легированные стали имеют более низкое критическое обжатие [9]. По мнению И. А. Фомичева, О. А. Пляцковского и других, наличие оправки снижает осевые растягивающие напряжения,  $\frac{\sigma}{T}$  становится меньше нуля, что предотвращает преждевременное вскрытие полости, а по мнению А. З. Глейберга и П. К. Тетерина, оправка приводит к уменьшению коэффициента осевого скольжения, увеличению цикличности деформации и уменьшению частного обжатия, что способствует преждевременному вскрытию полости в заготовке и образованию плен на внутренней поверхности гильзы.

### 1.3.3. Скручивание заготовки в валках

В процессе винтовой прокатки заготовка подвергается скручиванию, которое возникает из-за различной скорости ее вращения в смежных сечениях [5]. Скручивание заготовки при прошивке способствует обра-

зованию дефектов на заготовке (трещин, волосовин, плен). Теоретические и экспериментальные исследования эффекта скручивания при прошивке были проведены П. Т. Емельяненко, И. А. Фомичевым, П. К. Тетериним, Я. Л. Ваткиным, М. И. Ханиным, В. Я. Осадчим, З. З. Ходаком и др. Причиной скручивания гильзы является изменение по длине очага деформации отношения радиуса вала к радиусу заготовки —  $R_x/r_x$ . Если отношение  $R_x/r_x$  по ходу прокатки возрастает, то заготовка скручивается в направлении ее вращения, а если отношение  $R_x/r_x$  уменьшается, то заготовка скручивается в направлении, противоположном ее вращению. Величина скручивания заготовки характеризуется углом поворота  $\Theta_{\text{скр}}$  рассматриваемого сечения относительно его первоначального положения  $\Theta$  или углом наклона винтовой линии скручивания  $\delta_{\text{скр}}$  на поверхности заготовки ( $\text{tg } \delta_{\text{скр}} = \left(\frac{r}{l}\right) \Theta_{\text{скр}}$ , где  $r$  — радиус заготовки или гильзы;  $l$  — длина участка, на котором измеряют углы  $\delta_{\text{скр}}$  и  $\Theta_{\text{скр}}$  (шаг линии скручивания) (рис. 1.6).

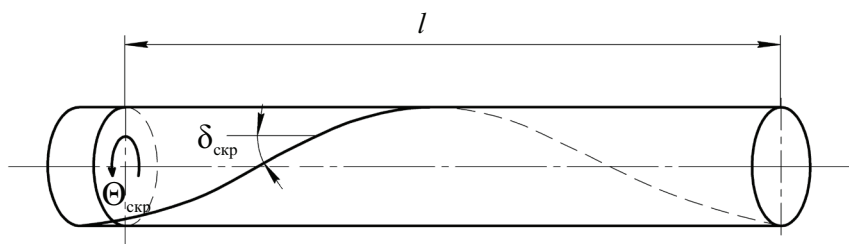


Рис. 1.6. Схема определения угла скручивания заготовки

Скручивание может отсутствовать только в том случае, если отношение радиуса вала к радиусу заготовки (гильзы) остается постоянным по длине очага деформации:  $R_x/r_x = \text{const}$ .

Несмотря на некоторое улучшение механических свойств металла в результате скручивания, его следует отнести к вредным влияниям. Полностью избежать скручивающего действия валков практически невозможно. На прошивных станах с бочковидными валками разноименное скручивание совершенно не представляется возможным исключить. Поэтому лучшие условия протекания процесса прошивки обеспечиваются в прошивных станах с грибовидными валками, где можно избежать разноименного скручивания [3; 6].

## 1.4. Способы повышения надежности и стабильности процесса

Стабильность процесса прошивки способом винтовой прокатки обеспечивается выполнением условий первичного и вторичного захвата, а также условия надежного окончания процесса прошивки при выдаче гильзы из валков стана. Теоретические исследования, выполненные П. К. Тетериным, показали, что для улучшения захвата заготовки необходимо, чтобы действие внешнего осевого усилия, приложенного к заднему торцу заготовки, не прекращалось до тех пор, пока ее окружная скорость не достигает своего критического значения, при котором наступает осевое втягивание металла в валки; скорость и усилие вталкивателя заготовки в валки должны быть минимальными. Для улучшения условий захвата целесообразно также придавать заготовке при вталкивании ее в валки вращательное движение. Улучшению условий вторичного захвата в значительной мере способствует зацентровка заготовки: в центре переднего торца заготовки делается углубление, соответствующее по форме и размерам носку оправки [4]. Такое углубление увеличивает площадь ее касания с валками до встречи с оправкой и улучшает условия вторичного захвата.

С целью обеспечения благоприятных условий первичного и вторичного захватов при повышенных обжатиях заготовки используются так называемые двухконусные или ступенчатые калибровки валков. Входной участок таких валков выполняют комбинированным, состоящим из двух конусных участков: первого — для осуществления стабильного первичного захвата с малым значением конусности ( $1-3,5^\circ$ ) и второго — обжимного, с повышенным углом конусности ( $3,5-7^\circ$ ).

Во входном конусе валка применяют профильные кольцевые гребни (см. рис. 1.7, а), специальные пазы (см. рис. 1.7, б) или гребни, расположенные по винтовой линии (см. рис. 1.7, в), которые улучшают захват заготовки валками и повышают надежность процесса прошивки. Износ входного конуса валка приводит к ухудшению захвата заготовки, уменьшению стабильности и надежности процесса прокатки.

На трехвалковых станах винтовой прокатки по сравнению с двухвалковыми захват заготовки осуществляется более надежно, особенно если применяется чашевидная калибровка, поэтому их применяют в качестве обжимных станов для изменения диаметра и проработки литой структуры непрерывно-литых заготовок. Отсутствие на-

правляющего инструмента на этих станах способствует уменьшению энергозатрат.

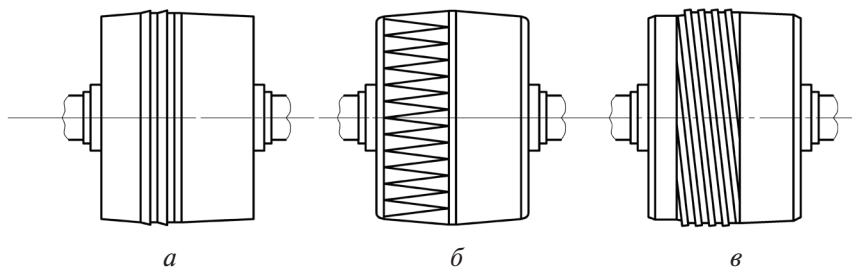


Рис. 1.7. Специальные калибровки прокатных валков:

*a* — кольцевая; *б* — пазовая; *в* — винтовая

Важным условием стабильности процесса прошивки является применение мер для предотвращения преждевременного вскрытия полости при винтовой прошивке непрерывно-литых заготовок и повышение величины критического обжатия  $\varepsilon_{кр}$ . Если обжатие заготовки перед носиком оправки превосходит критическое значение  $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$ , то происходит преждевременное вскрытие полости и образуются дефекты на внутренней поверхности гильзы. Поэтому повышение пластичности стали при внепечной обработке в ковше-печи путем модифицирования и улучшения структуры при непрерывной разливке способствует повышению надежности и стабильности процесса. Все меры, приводящие к уменьшению отношения диаметра заготовки к ширине контактной поверхности и показателя напряженного состояния  $\frac{\sigma}{T}$  в осевой зоне заготовки, приводят к росту пластичности стали и величины критического обжатия.

Таким образом, комплексное условие надежности и стабильности процесса винтовой прошивки должно потребовать удовлетворения условий надежного захвата заготовки валками и предотвращения преждевременного вскрытия полости:

$$\varepsilon_{кр} > \varepsilon > \varepsilon_0. \quad (1.10)$$

## 2. Компьютерное моделирование процесса винтовой прокатки

---

### 2.1. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением

---

Основными целями компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением являются: исследование формоизменения заготовки; изучение влияния схемы и технологических режимов деформации на точность изделия; расчет полей степени и скорости деформации, напряжений и температуры в объеме и на поверхности деформируемого тела; исследование процессов изменения дислокационной, зеренной структур и фазового состава сталей на различных этапах технологического процесса, а также расчет силовых параметров исследуемого процесса деформации. Общеизвестным методом компьютерного моделирования технологических процессов являются алгоритмы, основанные на применении вариационных принципов механики и метода конечных элементов (МКЭ).

#### 2.1.1. Развитие конечно-элементного моделирования процессов обработки металлов давлением на основе вариационного принципа механики, предложенного В. Л. Колмогоровым

Разработка методов решения краевых задач обработки металлов давлением (ОМД) на основе вариационных принципов механики осуществлялось с 1954 г. в работах Н. Н. Красовского, А. А. Поздеева, В. Л. Колмогорова, И. Я. Тарновского, Г. Я. Гуна и др. Основные достижения были связаны с конструированием функционалов, разработкой прямых методов приближенного решения вариационных за-

дач и способов представления виртуальных полей скоростей и полей напряжений с помощью координатных функций и варьируемых параметров. В.Л. Колмогоров сконструировал функционал и получил вариационное уравнение:

$$\delta J = \int_V [\sigma_{ij}^{\circ} \delta \xi_{ij}^{\circ} + \xi_{ij}^{\circ} \delta \sigma_{ij}^{\circ} + \rho(w_i - g_i) \delta v_i^{\circ}] dV - \int_{S_v} \delta f_i^{\circ} v_i^* ds - \int_{S_s} (\delta f_v^{\circ} v_v^* + f_{\tau}^{\circ} \delta v_{\tau}^{\circ} + \delta f_{\tau}^{\circ} v_{\tau}^{\circ}) ds - \int_{S_f} f_i^* \delta v_i^{\circ} ds = 0. \quad (2.1)$$

Здесь  $V$  — объем деформируемого тела;  $S_v$  — часть поверхности тела, на которой задан вектор скорости  $v_i = v_i^*$ ;  $S_f$  — часть поверхности, на которой заданы напряжения  $\sigma_{ij} \cdot n_j = f_i^*$ ;  $S_s$  — поверхность скольжения, на которой известна нормальная составляющая вектора скорости  $v_v = v_v^*$  и задан закон трения  $f_{\tau}(f_v, v_s, \theta) = f_{\tau}^*$ . Напомним, что вариации от заданной функции  $f_i^*$ ,  $v_i^*$ ,  $v_v^*$ ,  $f_{\tau}^*$  равны нулю.

Уравнение (2.1) соответствует вариационному принципу виртуальных полей скоростей  $v_i^{\circ}$  и напряжений  $\sigma_{ij}^{\circ}$ . В.Л. Колмогоров доказал, что для общего случая движения сплошной, сжимаемой и упрочняющейся среды с изотропными свойствами из условия стационарности функционала  $\delta J = 0$  следует полная система дифференциальных и конечных уравнений механики. Таким образом, решение системы уравнений механики совместно с граничными и начальными условиями можно заменить решением вариационной задачи. Однако он не предложил процедуру решения задач из-за трудностей выбора координатных функций для виртуальных полей скоростей и напряжений для объемного очага деформации, а также необходимости учета изменяющихся во времени характеристик упрочнения и разупрочнения металла. Первая проблема была решена создателем метода конечных элементов с помощью функций формы конечного элемента и варьируемых параметров, которыми является значение искомых функций в узлах конечного элемента.

## 2.1.1.1. Шаговая процедура решения краевой задачи ОМД

Для построения шаговой процедуры решения вариационной задачи будем полагать, что в любой момент времени  $\tau = t$  объем деформируемого тела  $v$  и поверхности  $S = S_f \cup S_v \cup S_s$ , сопротивление деформации  $\sigma_s$ , равное интенсивности напряжений  $\sigma_u$ , для различных конечных элементов вследствие неодинаковых условий упрочнения имеют разные значения, но за малый промежуток времени шага  $\Delta\tau \rightarrow 0$  решение задачи в пределах одного элемента  $\sigma_s$  не изменяется, так же как и координаты узлов элемента, значения скорости  $\xi_u$  и степени  $\epsilon_u$  деформации, среднего нормального напряжения  $\sigma$  и температуры  $\theta$ . Для каждого элемента выполняется условие идеальной пластичности  $\sigma_u = \sigma_s$ , а на поверхности скольжения задан закон трения. Для этого случая функционал, соответствующий вариационному уравнению (2.2), будет иметь вид:

$$J_1 = \int_V \left[ \tau_s \dot{\epsilon}_u^o + \sigma \dot{\epsilon}^o \right] dV - \int_{S_v} \sigma \delta_{ij} + \frac{2\tau_s}{\epsilon_u^o} \dot{\epsilon}_{ij}^o n_j v_i^* ds - \\ - \int_{S_f} f_i^* v_i^o ds - \int_{S_s} (f_v^* v_v^* + f_\tau^* v_\tau^o) ds. \quad (2.2)$$

Для определения поля температур необходимо решить связанную термомеханическую задачу с привлечением функционала

$$J_2 = \int_V \left[ \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^o - \lambda \Delta^2 \theta - c p \theta_{,i} \right] dV + \int_{S_s} [\tau v_s^o - \alpha \Delta \theta] ds - \int_{S_v} \alpha \Delta \theta ds. \quad (2.3)$$

В выражение (2.3) входят компоненты тензоров напряжений и скоростей деформации, напряжение трения и скорость скольжения материальной частицы относительно инструмента, которые предварительно определяются из решения вариационной задачи с использованием функционала (2.2).

В общем случае искомыми величинами решения вариационной задачи являются значения вектора скорости  $v_{i\alpha}$  среднего нормального напряжения  $\sigma_\alpha$  и температуры  $\theta_\alpha$  в узлах конечного элемента, а распределение этих величин внутри элемента и обеспечение непрерывности этих величин на границе элементов обеспечивается функцией

формы конечного элемента. Действительные значения искомым величин в узлах конечных элементов соответствуют минимуму функционалов  $J_1$  и  $J_2$  связанной термомеханической задачи и находят их значения из решения системы алгебраических уравнений:

$$\frac{\partial J_1}{\partial (v_i)_\alpha} = 0; \frac{\partial J_1}{\partial (\sigma)_\alpha} = 0; \frac{\partial J_2}{\partial (\theta)_\alpha} = 0, \quad (2.4)$$

где  $\alpha$  — номер узла конечного элемента.

Если время одного шага решения  $\Delta\tau$ , то новые координаты узлов находят

$$(x_i)_\alpha = (x_{i0})_\alpha + (v_i \cdot \Delta\tau)_\alpha \quad (2.5)$$

Установив с помощью функций формы конечного элемента вектор скорости  $v_i$ , вычисляют компоненты тензора скорости деформации, интенсивность скорости деформации и приращение степени деформации для конечного элемента. Вычислив значение среднего нормального напряжения для конечного элемента, определяют компоненты тензора напряжений и интенсивность напряжений. Вычисленное значение интенсивности напряжений сравнивается со значением сопротивления деформации, определяемым моделью деформируемого тела. На втором шаге решения задачи процедура решения повторяется. С помощью уравнения (2.5) осуществляется анализ формоизменения заготовки в очаге деформации за конечный промежуток времени от 0 до момента  $t$ .

#### 2.1.1.2. Структурно-чувствительная модель деформируемого тела

При исследовании технологических процессов обработки металлов давлением чаще всего применяют вязкопластическую, либо упруго-пластическую модели. Первая модель применяется для изучения процессов горячей деформации, вторая — холодной деформации. Модели деформируемого тела имеют важное значение при формулировке определяющих соотношений, устанавливающих связь компонентов тензора напряжений и тензоров скорости и степени деформации, а также температуры.

В общем виде эта связь выражена уравнениями

$$\sigma_{ij} = f_{ij}(\xi_{kl}). \quad (2.6)$$



Функции  $f_{ij}$  соответствуют условию тензорной размерности, т. е. сохранению ранга и симметрии тензора скорости деформации. Для этого тело обладает свойством изотропности, т. е. равенство сопротивления деформации во всех направлениях. Причем процессы упрочнения и разупрочнения, сопровождающие деформацию при обработке давлением, условие изотропности не нарушают. Из гипотезы изотропности следует гипотеза коаксиальности тензоров напряжений и скоростей деформации, а также гипотеза пропорциональности девиаторов напряжений и скоростей деформации. Условие пропорциональности можно записать так:

$$s_{ij} = \psi e_{ij}. \quad (2.7)$$

Коэффициент пропорциональности  $\psi$  определяется через инвариантные характеристики девиаторов  $\psi = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\dot{\varepsilon}_u}$ , где  $\sigma_u = \left( \frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} \right)^{1/2}$  — интенсивность напряжений, равная сопротивлению деформации в произвольный момент времени  $\sigma_u = \sigma_s$ , а  $\dot{\varepsilon}_u = \left( \frac{2}{3} e_{ij} e_{ij} \right)^{1/2}$  — интенсивность скорости деформации,  $s_{ij}$  и  $e_{ij}$  — компоненты девиаторов напряжений и скоростей деформации. Сопротивление деформации в общем случае зависит от того, как во времени протекают процессы упрочнения и разупрочнения. На упрочнение металла оказывает влияние степень деформации  $\varepsilon_u$  — в этом случае говорят о деформационном упрочнении, а также скорость деформации  $\dot{\varepsilon}_u$  — о вязком упрочнении. Деформационное и вязкое виды упрочнения зависят от температуры. При холодной деформации влиянием скорости деформации пренебрегают, учитывается только деформационное упрочнение. При горячей деформации учитывается как деформационное, так и вязкое виды упрочнения металла

$$\sigma_u = \sigma_u(\varepsilon_u(\tau), \dot{\varepsilon}_u, \theta), \quad (2.8)$$

где  $\varepsilon_u(\tau)$  — известная функция развития деформации во времени, определяется интегрированием,  $\varepsilon_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau$ . При горячей деформации наряду с упрочнением протекают релаксационные процессы, характеризу-

ющие разупрочнение металла за счет динамической полигонизации и динамической рекристаллизации. Динамическая рекристаллизация наблюдается при низкой скорости деформации, близкой к скорости ползучести. Для большинства процессов обработки металлов давлением динамическая рекристаллизация не успевает произойти. Отметим, что число центров динамической рекристаллизации сравнительно невелико, поэтому зеренная структура является крупной, а размер зерна при неблагоприятных условиях может быть больше размера зерна в исходном состоянии. В процессе обработки давлением релаксация напряжений и уменьшение сопротивления деформации происходит в результате перестройки дислокационной структуры, а зеренная структура остается неизменной. В случае, если при динамической полигонизации сформируется субзеренная структура с высокой плотностью и подвижностью границ, являющихся стоком для дислокаций, и значительной разориентировкой кристаллографических направлений в соседних субзернах, скорость процесса разупрочнения может быть равной или превосходить скорость деформационного упрочнения. Субзерна со значительной разориентировкой кристаллографических направлений и высокой подвижностью границ играют роль центров рекристаллизации, поэтому возрастает их число, а зеренная структура в результате последующей рекристаллизации становится мелкозернистой. Такие субзерна называются полигонизованными, а рекристаллизация, протекающая в период междеформационной паузы либо подогрева заготовки, называется метадинамической. При отсутствии полигонизованных субзерен для осуществления рекристаллизации необходима дополнительная энергия, сообщаемая металлу при повторном нагреве, либо при термообработке. Такая рекристаллизация называется статической. Размер зерна после статической рекристаллизации больше, чем после метадинамической. Таким образом, сложные процессы деформационного и вязкого упрочнения металла при пластической деформации, а также процессы разупрочнения, развивающиеся во время деформации за счет динамической полигонизации и метадинамической рекристаллизации во время междеформационной паузы, требуют разработки динамических моделей реологического поведения металла с учетом изменения дислокационной и зеренной структур. Поскольку модели изменения дислокационной и зеренной структур, а также их влияние на процессы упрочнения и разупрочнения в литературе отсутствуют, нашли распространение феноменоло-

гические модели в виде интегральных дифференциальных и алгебраических уравнений. Недостатком этих моделей является упрощение физических представлений и математического описания процессов упрочнения и разупрочнения, а в некоторых случаях пренебрежение разупрочнением металла.

Обобщая сказанное, структурная модель деформируемого тела может быть представлена следующим образом:

$$\frac{d}{d\tau}(\sigma_S - \sigma_{S0}) = v_1 - v_2 - v_3, \quad (2.9)$$

где  $\sigma_{S0}$  и  $\sigma_S$  — начальное и текущее значения сопротивления деформации;  $v_1$  — скорость деформационного и скоростного упрочнения при деформации;  $v_2$  — скорость разупрочнения при динамической полигонизации во время деформации;  $v_3$  — скорость разупрочнения при метадинамической рекристаллизации во время междеформационной паузы.

Динамическая модель сопротивления деформации (2.9) включает вектор параметров  $a = (a_1, \dots, a_n)$ , которые определяются экспериментальными данными с использованием процедуры идентификации динамических объектов, в частности алгоритма, основанного на использовании коэффициентов чувствительности модели. А. В. Коновалов сформулировал основные требования к проведению динамического эксперимента: интенсивность деформации  $\dot{\epsilon}_u$  и температура  $\theta$  должны изменяться в широких пределах во время одного опыта. Уравнение (2.9) можно представить в конечно-разностной форме

$$\Delta\sigma_S = \sum_{i=1}^n (v_{1i} - v_{2i}) \Delta\tau_i + v_3 \cdot \tau_{\text{пауз}} \delta, \quad (2.10)$$

где  $\Delta\tau_i$  — время одного шага решения краевой задачи методом конечных элементов;  $\tau_{\text{пауз}}$  — время междеформационной паузы;  $v_{1i}$  и  $v_{2i}$  — средние значения скорости процессов скоростного и деформационного видов упрочнения и разупрочнения при изменении дислокационной структуры и формировании субзерен на  $i$ -м шаге решения задачи  $v_3 \cdot \tau_{\text{пауз}}$  — разупрочнение металла в период междеформационной паузы;  $\delta$  — дельта-функция принимает значение ноль, если  $\tau_{\text{пауз}} = 0$ , и единица, если  $\tau_{\text{пауз}} > 0$ .

Обозначим  $\Delta\sigma_{s0} = \sum_{i=1}^n (v_{1i} - v_{2i}) \Delta\tau_i$  — упрочнение металла при высокотемпературной обработке металлов давлением, характеризующее увеличение потенциальной энергии кристаллической решетки в процессе деформации преимущественно за счет образования подвижных границ полигонизованных субзерен и увеличения плотности дислокаций. Таким образом, рассмотрение динамической модели (2.9) сводим к рассмотрению статической модели (2.10), которую для междеформационной паузы можно записать так:

$$\Delta\sigma_s = \Delta\sigma_{s0} \cdot \exp \frac{\tau}{n} \delta, \quad (2.11)$$

где  $n$  — константа, которая зависит от материала, температуры изделия в период паузы и значения  $\delta$ -функции в уравнении (2.11). Значение  $\delta$ -функции определяется из следующих соображений:  $\delta = 1$ , если  $\Delta\sigma_{s0} \geq \Delta\sigma_{s*}$ , а  $\varepsilon_u \geq \varepsilon_{u*}$ , в противном случае  $\delta = 0$ . Сказанное можно пояснить с помощью рис. 2.1.

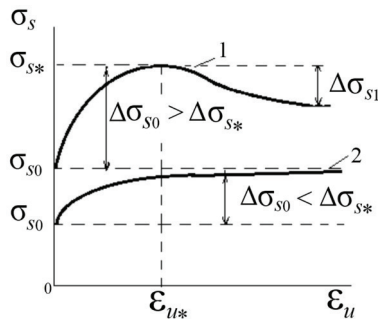


Рис. 2.1. Характер упрочнения металла при деформации

Кривая 1 на рис. 2.1 соответствует условиям деформации, обеспечивающим высокую интенсивность упрочнения на участке  $0 < \varepsilon_u < \varepsilon_{u*}$ . Видно, что на второй половине участка интенсивность упрочнения из-за релаксационного процесса, связанного с динамической полигонизацией и формированием субструктуры, уменьшается до нуля при  $\varepsilon_u = \varepsilon_{u*}$ , т. к. процессы упрочнения и разупрочнения находятся в равновесии. В некоторых случаях, как показывают опыты, скорость разупрочнения больше, чем скорость упрочнения, и наблюдается ниспадающий участок кривой упрочнения при  $\varepsilon_u > \varepsilon_{u*}$ . Для рассмотренного

случая критерием формирования полигонизованной структуры является удовлетворение двух критериев:  $\varepsilon_u \geq \varepsilon_u^*$  и  $\Delta\sigma_{s0} \geq \Delta\sigma_s^*$ , где  $\Delta\sigma_s^*$  — прирост сопротивления деформации металла, характеризующий потенциальную энергию сформировавшейся полигонизованной структуры, для которой характерно образование большого числа центров рекристаллизации. Благодаря этому при метадинамической рекристаллизации во время междеформационной паузы формируется ультрадисперсная структура. Кривая 2 на рис. 2.1 соответствует таким условиям деформации, которые не обеспечивают образование полигонизованной субструктуры ( $\Delta\sigma_{s0} < \Delta\sigma_s^*$ ), следовательно, трудно ожидать протекания эффективной метадинамической рекристаллизации и уменьшения размера зерна.

На рис. 2.2 представлены опытные кривые деформационного и скоростного упрочнения стали в зависимости от степени и скорости деформации при температуре 1200 °С, полученные К. Б. Лабером, Х. С. Дыей и А. М. Кавалек по результатам испытаний образцов на торсионном пластометре «STD812» Ченстоховского технологического университета. Аналогичный характер имеют кривые упрочнения при других температурах в диапазоне от 800 °С до 1150 °С. Общим для всех кривых упрочнения является высокая скорость упрочнения в начальный период деформации, когда действие релаксационных процессов не проявляется.

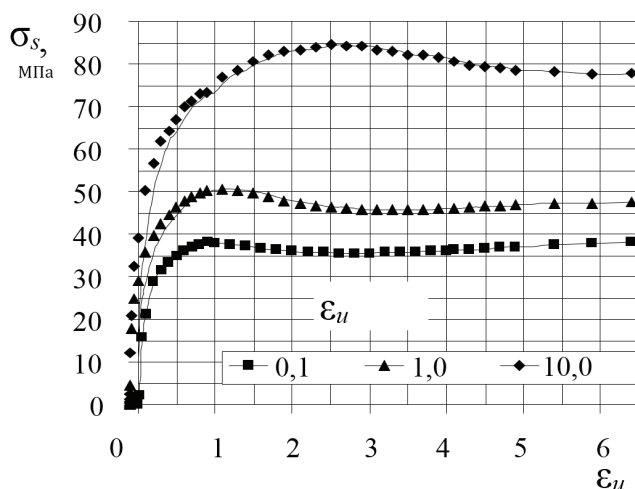


Рис. 2.2. Кривые упрочнения углеродистой низколегированной стали при температуре 1200 °С

Затем, начиная от  $\varepsilon_u = (0, 2 - 0, 3)$ , интенсивность упрочнения стали уменьшается, а при некотором значении  $\varepsilon_u = \varepsilon_u^*$  в результате равновесия процессов упрочнения и разупрочнения интенсивность упрочнения уменьшается до нуля, а сопротивление деформации достигает максимального значения —  $\sigma_s^{\max}$ . При  $\varepsilon_u > \varepsilon_u^*$  при температуре (800–900 °С) и скорости деформации более 1,0 (1/с) равновесное состояние сохраняется, но с ростом температуры и уменьшением скорости деформации наблюдается падение сопротивления деформации на величину  $\Delta\sigma_{s1}$  (см. рис. 2.1). Используя опытные данные, приведенные на рис. 2.2, нетрудно определить значения  $\Delta\sigma_{s0}$  и  $\Delta\sigma_{s1}$  в зависимости от температуры и скорости испытания образцов, а также от химического состава сталей и сплавов.

#### 2.1.1.3. Дополнение алгоритма шаговой процедуры решения краевой задачи ОМД

В начале решения задачи конечно-элементного моделирования сопротивление деформации принимается одинаковым во всем объеме очага деформации и на поверхности деформируемой заготовки равным  $\sigma_{s0}$ . После первого шага решения за время  $\Delta t$  в каждом конечном элементе определяются значения степени  $\varepsilon_u$  и скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_u$ , а также среднего нормального напряжения  $\sigma$  и температуры. В процессе решения на первом шаге координаты элементов, температура, сопротивление деформации, закон трения на поверхности скольжения не изменяются, а модель среды принимается идеально-пластической. После завершения решения вариационной задачи (2.5) определяются новые координаты узлов конечных элементов и оценивается формоизменение заготовки за время  $\Delta t$ , а также осуществляется расчет сопротивления деформации для каждого конечного элемента, оценивая вклад процесса деформационного и вязкого упрочнения  $v_1 \cdot \Delta t$ , процесса разупрочнения в связи с изменением дислокационной и формированием субзеренной структуры  $v_2 \cdot \Delta t$ . Деформационное и вязкое упрочнение металла осуществляется с применением параметрических кривых упрочнения, полученных при испытании образцов на пластометре и аппроксимированных выражением

$$\sigma_s = A \varepsilon_u^n \cdot \dot{\varepsilon}_u^k \exp(-\rho \theta). \quad (2.12)$$

На втором и последующих шагах решения задачи процедура корректировки значений сопротивления деформации в конечных элементах повторяется. После завершения анализа деформации заготовки на последнем шаге с использованием критериев  $\varepsilon_u > \varepsilon_u^*$  и  $\Delta \sigma_{s0} \geq \Delta \sigma_s^*$  оценивается формирование полигонизованной субструктуры и определяется вид рекристаллизации во время паузы: метадинамическая или статическая, что позволяет оценить количественные характеристики зеренной структуры. Разупрочнение металла при рекристаллизации во время паузы и уменьшение значения сопротивления деформации  $v_3 \cdot \tau_{\text{пауз}}$  рассчитывается по формуле (2.11).

### 2.1.2. Основы работы в программе Deform

Программа Deform предназначена для моделирования процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки. Работа программы основана на методе конечных элементов. При этом весь процесс расчета делится на шаги.

Достоинства Deform:

- 1) позволяет моделировать различные процессы обработки металлов давлением любой сложности;
- 2) позволяет сократить издержки на проведение испытаний;
- 3) позволяет сократить затраты времени от начала проектирования до внедрения новой технологии.

Модули Deform:

- DEFORM-3D — модуль, предназначенный для моделирования трехмерных процессов обработки металлов давлением.
- DEFORM-2D — модуль, предназначенный для моделирования двумерных процессов обработки металлов давлением (осесимметричные и плоские задачи).
- DEFORM-F3 — модуль, предназначенный для моделирования трехмерных процессов обработки металлов давлением. Является «облегченной» версией DEFORM-3D.
- DEFORM-F2 — модуль, предназначенный для моделирования двумерных процессов обработки металлов давлением (осесимметричные и плоские задачи), «облегченная» версия DEFORM-2D.

В программе Deform есть возможность задания следующих моделей сред:

- 1) вязкая среда;
- 2) вязкопластическая среда;
- 3) упругая среда;
- 4) упруговязкая среда;
- 5) упругопластическая;
- 6) идеальная пластическая среда.

Программа состоит из трех модулей: Preprocessor, Simulator и Postprocessor. Модуль Preprocessor предназначен для создания моделей процессов и задания граничных условий (условия трения, силовые условия, условия теплопроводности, скоростные условия и т. д.). Модуль Simulator предназначен для проведения вычислительных расчетов и записи полученных результатов в конечный файл базы данных, для задания количества процессоров, участвующих в процессе расчета, для остановки и запуска процесса расчета, а также для отображения результатов расчета. Модуль Postprocessor предназначен для чтения базы данных после завершения моделирования и отображения результатов расчета в виде графика и массива чисел.

### 2.1.3. Pre Processor

Разделы Pre Processor представлены на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Разделы Pre Processor

Раздел Machining предназначен для моделирования процессов механической обработки.



Раздел Forming — для исследования процессов формоизменения.

Раздел Die Stress Analysis — для анализа напряжений в инструменте.

Раздел Coqqing — для моделирования процессаковки.

Раздел Shape Rolling — для моделирования процесса сортовой прокатки.

Раздел Ring Rolling — для моделирования процесса прокатки колес.

Раздел Deform-3D Pre — для моделирования процессов обработки металлов давлением.

Раздел Heat Treatment — для моделирования процесса нагрева. Раздел Deform-3D Pre предназначен для моделирования процессов обработки металлов давлением. Интерфейс Pre Processor представлен на рис. 2.4:

Database-файл — файл, в котором хранится полная информация о поставленной задаче, необходимая для проведения расчета.

Key-файл — файл, в котором сохранены сведения о граничных условиях, заданных пользователем.

Simulation Controls позволяет выбирать следующие параметры: тип решаемой задачи (деформирование либо теплопередача); единицы измерения; типы моделирования (анализ Лагранжа, прокатка-раскатка колес, сортовая прокатка, обработка резанием, прессование); способ задания шагов расчета (через время или расстояние); параметры остановки процесса расчета; способы переразбиения сетки конечных элементов в случае возникновения дефекта сетки или отсутствия сходимости решения; методы вычисления; изменять значение констант (температура окружающей среды, коэффициент конвекции, постоянная Больцмана); задавать условия остановки.

Material позволяет выбирать материал заготовки и инструмента из библиотеки материалов. При этом есть возможность использовать при моделировании материал, для которого заранее определены упругие константы и кривая упрочнения.

Object positioning позволяет позиционировать объекты.

Inter object позволяет задавать условия трения и коэффициенты теплопроводности между инструментом и заготовкой; между заготовкой, инструментом и окружающей средой.

Database generation позволяет генерировать базу данных, необходимую для выполнения процесса расчета, а также проверять правильно ли заданы все параметры.

Линейка позволяет проводить измерения трехмерных и двухмерных объектов.

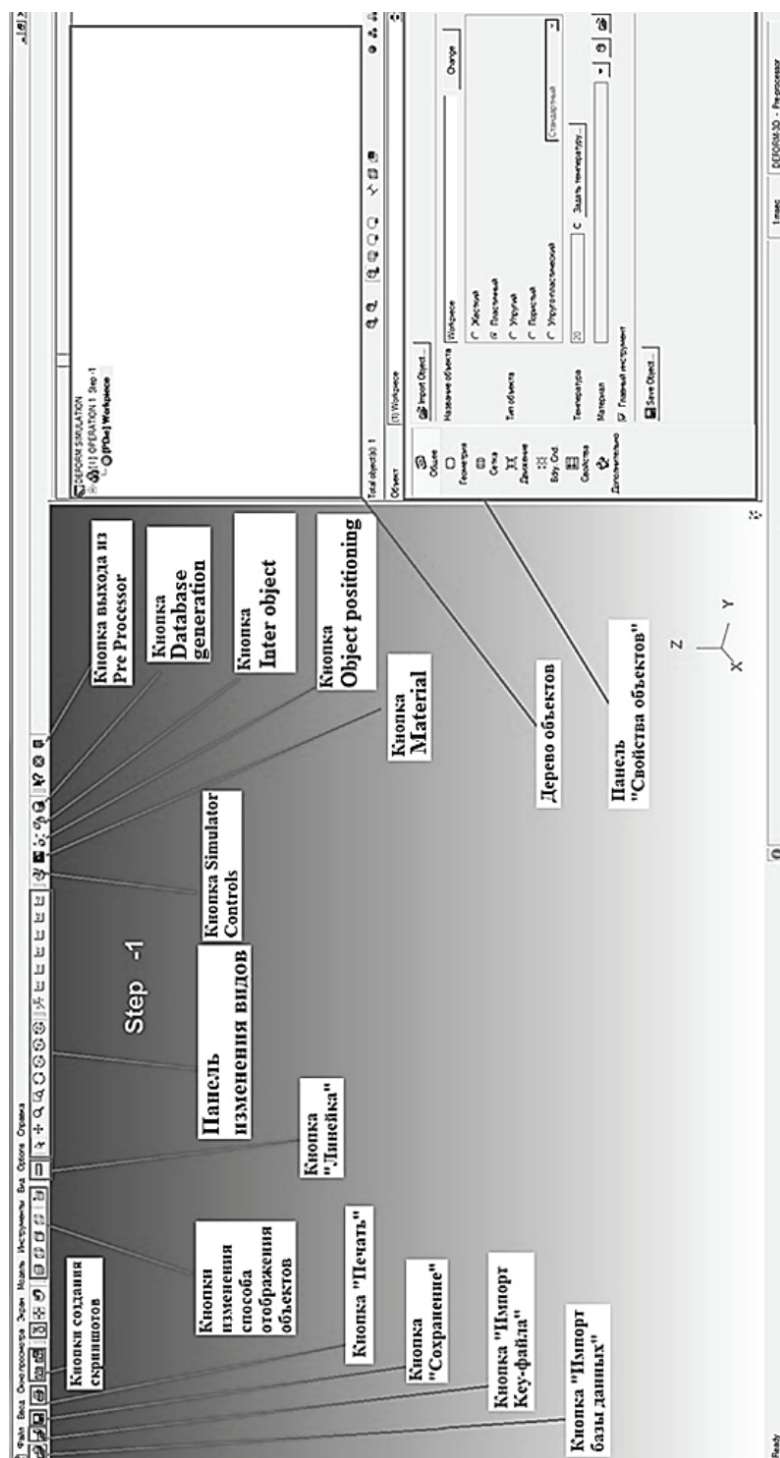


Рис. 2.4. Интерфейс Pre Processor

Панель изменения видов позволяет менять виды отображения объектов.

Поле «Дерево объектов» предназначено для отображения объектов (заготовка и инструмент), типа объекта (жесткий, пластичный, пористый, упругопластический), количества конечных элементов, а также — материала. Панель «Свойства объектов» предназначена для задания типа объекта (жесткий, пластичный, пористый, упругопластический); создания геометрических примитивов (цилиндры и параллелепипеды); задания плоскостей симметрии для решения симметричных задач; создания сетки конечных элементов; задания поверхностей теплопередачи; вычисления и компенсации объема заготовки; применения булевых операций и др.

#### 2.1.4. Simulator

Разделы Simulator представлены на рис. 2.5. Раздел Run предназначен для запуска процесса расчета, раздел Run (options) — для запуска процесса расчета, а также выбора количества процессоров, задействованных в процессе расчета (рис. 2.6).

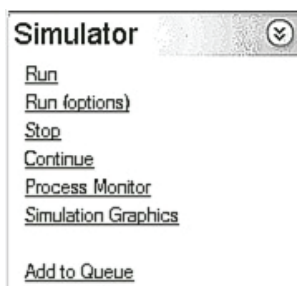


Рис. 2.5. Разделы Simulator

Кнопка Stop предназначена для остановки процесса расчета, но при этом придется дожидаться окончания текущего расчета. Кнопка Continue — для запуска процесса расчета после остановки. Кнопка Kill позволяет немедленно останавливать процесс расчета. Кнопка Process Monitor предназначена для отображения в виде списков задач, а также немедленной остановки процесса расчета (см. рис. 2.7). Раздел Simulation Graphics — для графического отображения про-

песса расчета, а также отображения на заготовке степени деформации, скорости деформации, напряжения, температуры и поврежденности (рис. 2.8).

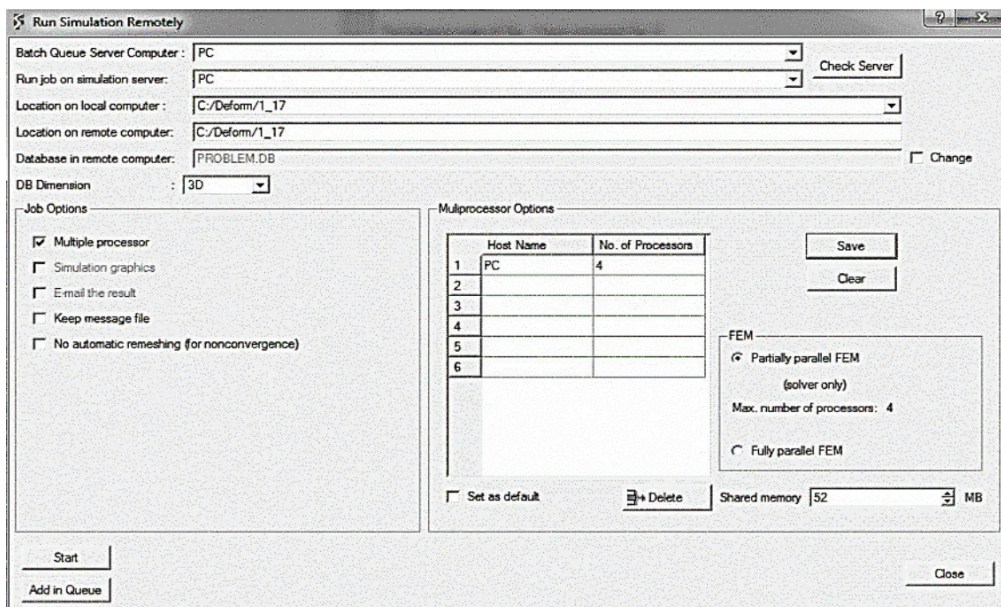


Рис. 2.6. Раздел Run (options)

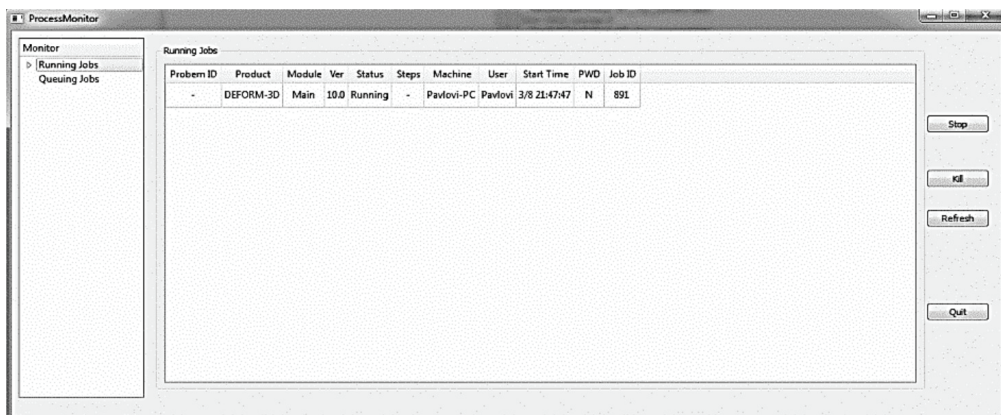


Рис. 2.7. Раздел Process Monitor



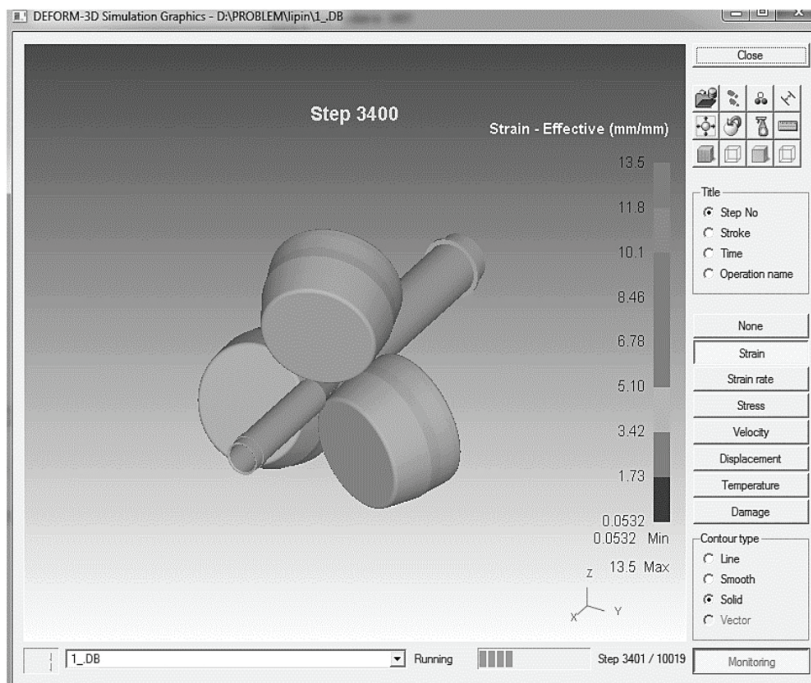


Рис. 2.8. Раздел Simulation Graphics

### 2.1.5. Post Processor

На рис. 2.9 представлен интерфейс Post Processor:

Object Nodes и Object Elements используется для выделения узлов сетки конечных элементов.

Summary содержит в себе сводную информацию о моделировании (максимальные и минимальные значения напряжений, перемещений, степени деформации и т. д.).

Graph (Load Stroke) используется для построения графиков зависимости усилий, действующих на объекты моделирования.

Point Tracking — для получения различных параметров в конкретной точке.

State Variable Between Two Points позволяет строить графики на основе данных в точках, расположенных между двумя базовыми точками.

Flow Net позволяет визуально наблюдать за течением слоев металла при пластической деформации.

Slicing позволяет создавать разрезы.

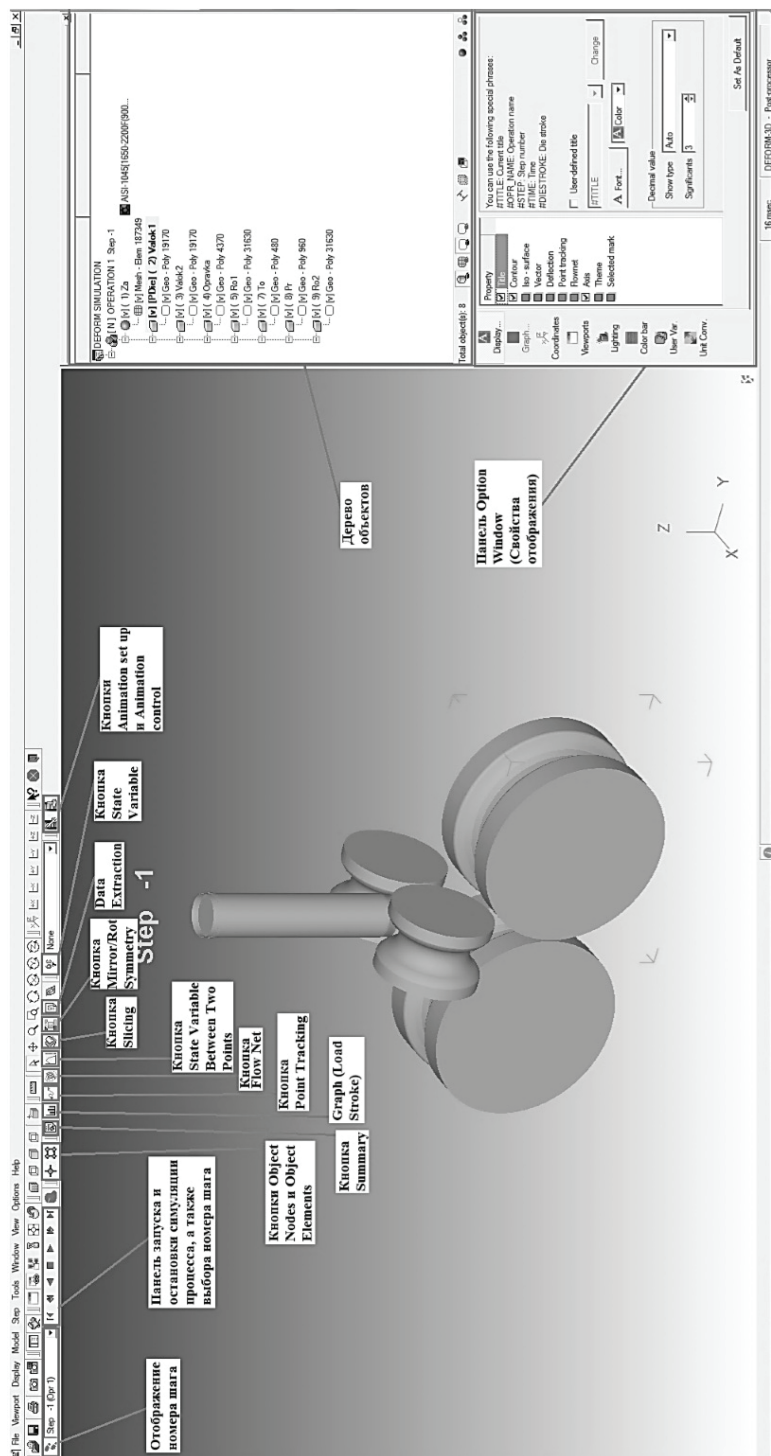


Рис. 2.9. Интерфейс Post Processor

Mirror/Rot Symmetry позволяет достраивать вторую половину симметричного объекта.

Data Extraction позволяет извлекать данные любых переменных для выбранных объектов во внешний текстовый файл.

State Variable позволяет выбирать переменные (степень деформации, скорость деформации, напряжения, температуры и т. д.), которые отображаются визуально с помощью окрашивания заготовки в разные цвета и их оттенки на графиках.

Animation set up, Animation controls позволяет создавать анимацию.

Панель Option Window позволяет менять параметры отображения и воспроизведения графики и анимации.

## **2.2. Деформированное состояние металла при обжатии заготовки в трехвалковом стане винтовой прокатки**

---

Важное значение для развития теории винтовой прокатки имеют работы С. П. Галкина, В. Л. Колмогорова, А. Н. Никулина, В. Я. Осадчего, Е. И. Панова, Б. А. Романцева, П. К. Тетерина и др. С. П. Галкин занимался исследованием формоизменения металла в процессе винтовой прокатки на трехвалковом стане, реологии сталей, а также разработкой режимов прокатки и универсальных калибровок технологического инструмента. Е. И. Панов провел сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния при винтовой прокатке в двух- и трехвалковых станах с использованием компьютерного моделирования в программе Ansys и установил, что при прокатке в трехвалковом стане обеспечивается бóльшая суммарная пластическая деформация и более равномерное проникновение пластической деформации по сечению заготовки в очаге деформации. А. Н. Никулин установил, что при винтовой прокатке происходит сдвиговое смещение металла и локализация пластического течения в поверхностных слоях заготовки, что приводит к формированию на торцах заготовки осевых утяжин. Большой вклад в развитие теории винтовой прокатки внес В. Л. Колмогоров, он показал, что при винтовой прокатке деформация носит знакопеременный характер, и сформировал условие разрушения металла в осевой зоне заготовки.

Процесс деформации заготовок на трехвалковом стане винтовой прокатки получил большое распространение. Так, например,

на ТПА-80 ПАО «СинТЗ» используется трехвалковый стан винтовой прокатки для обжатия непрерывно-литой заготовки диаметром 150,156 мм до диаметра 120 мм перед прошивкой. Использование непрерывно-литой заготовки позволило повысить производительность трубопрокатного агрегата на 15 %, а также снизить себестоимость труб на 10 %. Также было установлено, что при обжатии на трехвалковом стане при винтовой прокатке происходит глубокая проработка структуры, в результате в черновых трубах из литой заготовки размер зерна меньше, чем в черновых трубах из катаных заготовок. В этой связи исследование деформированного состояния металла при винтовой прокатке является важной задачей, т. к. это позволит выбирать рациональные режимы деформации, разрабатывать новые калибровки инструмента, исследовать закономерности течения металла, а также обеспечить получение мелкозернистой структуры.

### 2.2.1. Постановка задачи компьютерного моделирования и планирование вычислительного эксперимента

Моделирование процесса обжатия заготовок в Deform-3D осуществлялось при угле подачи валков  $\beta = 16^\circ$ , угле раскатки  $\varphi = 12^\circ$  и скорости вращения валков  $n = 80$  об/мин. Использовалась действующая на ТПА-80 ПАО «СинТЗ» калибровка валков. Диаметр заготовки составлял 150 мм. Сведение валков производилось таким образом, чтобы на выходе из стана было обеспечено получение заготовки диаметром 120 мм. Из библиотеки материалов в программе Deform-3D для заготовки была выбрана сталь AISI-1045, аналогичная стали Ст45 по российскому стандарту. Температура нагрева заготовок принята равной  $1200^\circ\text{C}$ , температура инструмента —  $150^\circ\text{C}$ . Длина заготовки  $l_3 = 400$  мм была принята минимальной, но достаточной для формирования полного очага деформации. Характерный размер элемента в сетке был принят равным 3 мм. Показатель трения по Зибелю принят равным  $\psi = 1$ . На рис. 2.10 представлена трехмерная модель процесса прокатки на трехвалковом обжимном стане. Целевыми функциями вычислительного эксперимента являлись: значение степени суммарной деформации  $\varepsilon_u$ , длина шага винтовой линии  $l_v$ , относительное изменение радиуса заготовки  $\frac{r_1 - r_{10}}{r_0} = \frac{\Delta r}{r_0}$  (см. рис. 2.11) и отноше-



ние радиуса заготовки к ширине контактной поверхности  $\frac{r_0}{b}$  по длине очага деформации. Измерение и расчет параметров  $\varepsilon_u$ ,  $l_b$  производились вдоль траекторий перемещения пяти точек с различной радиальной координатой, а параметры  $\frac{\Delta r}{r_0}$  и  $\frac{r_0}{b}$  определились в точке 5, которая находилась на поверхности заготовки (см. рис. 2.12).

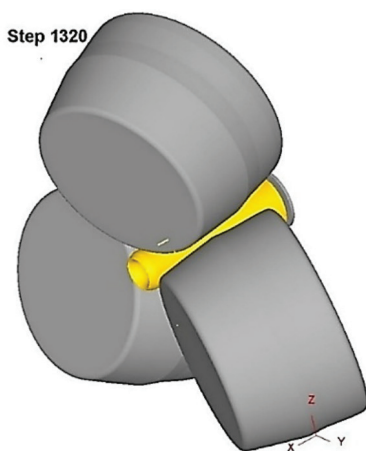


Рис. 2.10. Установившийся процесс обжатия заготовки

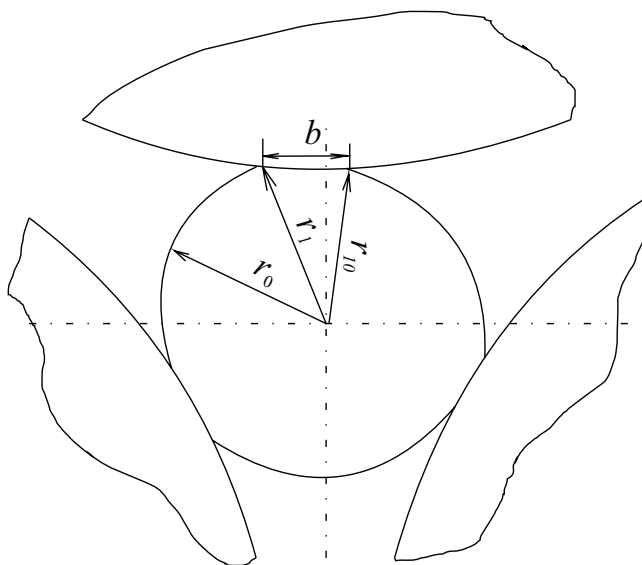
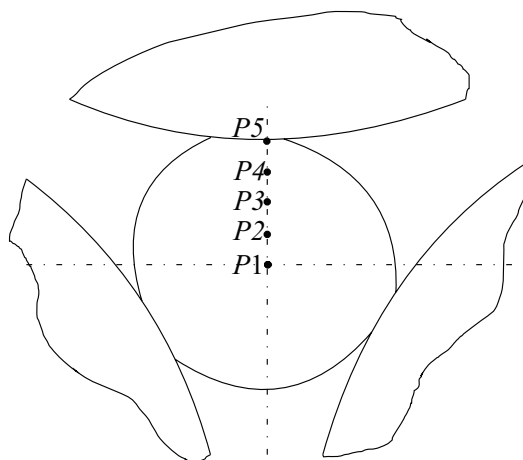


Рис. 2.11. Схема для измерения ширины контактной поверхности

Рис. 2.12. Точки для измерения параметров  $\varepsilon_u$ ,  $l_\theta$  и  $b$ 

### 2.2.2. Анализ результатов исследования

При винтовой прокатке в сечении с образующей на поверхности заготовки по траектории точки 5 происходит образование наплыва перед входом в очаг деформации, вызванное увеличением радиуса заготовки от  $r_0$  до  $r_1$  (см. рис. 2.11). Результаты измерения и расчета параметров  $\varepsilon_u$ ,  $l_\theta$ ,  $\frac{\Delta r}{r_0}$  и  $\frac{r_0}{b}$  представлены соответственно в табл. 2.1–2.4.

По данным табл. 2.1–2.4 были построены графики, которые представлены соответственно на рис. 2.11–2.16, на рис. 2.11  $r_0$  — радиус заготовки до образования наплыва;  $r_1$  — радиус заготовки перед входом в очаг деформации;  $r_{10}$  — радиус заготовки после обжатия валком. Все значения радиусов измерены в точке 5 вдоль ее винтовой траектории в локальном очаге деформации.

Таблица 2.1

**Значения степени деформации по сечению заготовки вдоль очага деформации**

Номер шага винтовой линии в очаге деформации	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
	$\varepsilon_u$				
1	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04
2	0,05	0,08	0,15	0,33	0,79
3	0,18	0,25	0,43	0,92	1,80
4	0,36	0,45	0,77	1,55	3,08

Окончание табл. 2.1

Номер шага винтовой линии в очаге деформации	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
	$\varepsilon_u$				
5	0,47	0,57	0,95	1,87	3,78
6	0,50	0,60	1,00	1,98	4,24
7	0,51	0,61	1,02	2,06	4,66
8	0,51	0,62	1,03	2,09	4,72

Таблица 2.2

**Значения длины шага винтовой линии вдоль очага деформации**

Номер шага винтовой линии в очаге деформации	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
	Длина шага винтовой линии $l_s$ , мм				
1	0	0	0	0	0
2	24,15	24,39	24,51	24,44	25,88
3	23,78	24,19	24,50	25,25	27,66
4	26,65	26,89	27,11	28,10	31,05
5	29,86	29,89	29,96	30,33	31,61
6	31,29	31,24	31,15	31,10	31,56
7	27,71	31,63	31,63	31,65	32,06
8	31,26	31,23	31,30	31,41	31,60

Таблица 2.3

**Значения относительного изменения радиуса заготовки вдоль очага деформации**

Номер шага винтовой линии в очаге деформации	$\Delta r/r_0$
	Точка 5
1	0,07
2	0,11
3	0,08
4	0,02
5	0,01
6	0,01
7	0,01
8	0,01

Таблица 2.4

**Значения относительного изменения радиуса заготовки вдоль очага деформации**

Номер шага винтовой линии в очаге деформации	$b$	$r_0$	$r_0/b$
	Точка 5		
1	20,70	76,77	3,71
2	25,85	71,50	2,77
3	24,15	64,68	2,68
4	15,66	60,83	3,89
5	9,14	60,28	6,59
6	8,38	60,13	7,17
7	7,52	60,27	8,01
8	7,43	60,15	8,10

Из рис. 2.13 видно, что степень деформации распределяется неоднородно по сечению заготовки. Значение суммарной степени деформации уменьшается от поверхности заготовки к ее оси. Максимальная степень деформации накапливается в точке 5, расположенной на контактной поверхности заготовки ( $\epsilon_u = 4,73$ ). Минимальная степень деформации накоплена в точке 1 ( $\epsilon_u = 0,51$ ). Полученная зависимость распределения степени деформации по сечению заготовки согласуется с результатами исследований С. П. Галкина и А. Н. Никулина.

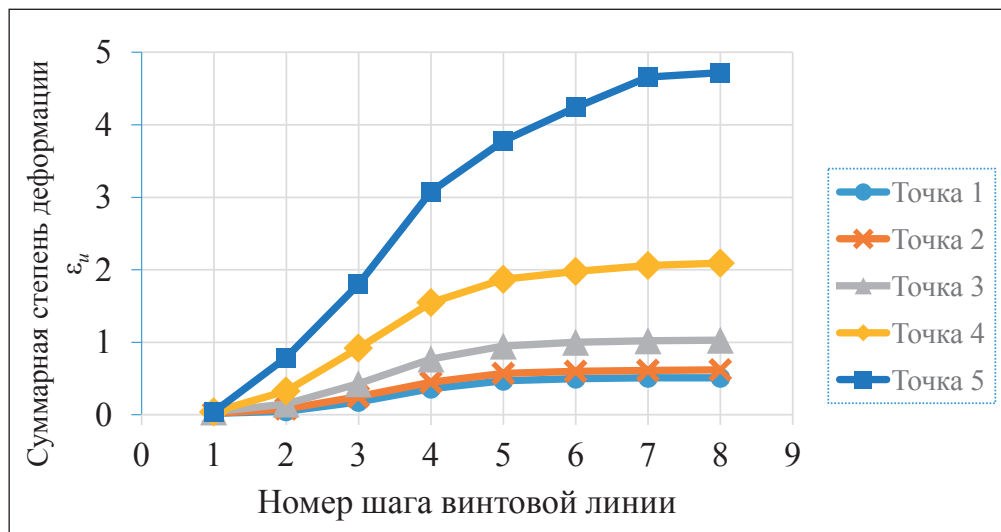


Рис. 2.13. Изменение суммарной степени деформации  $\epsilon_u$ , накопленной пятью точками вдоль очага деформации

Из рис. 2.14 видно, что перемещение частиц металла с различной радиальной координатой вдоль оси прокатки неодинаковое, точка 5 опережает другие точки. Остальные точки также смещаются вдоль очага деформации на различные расстояния.

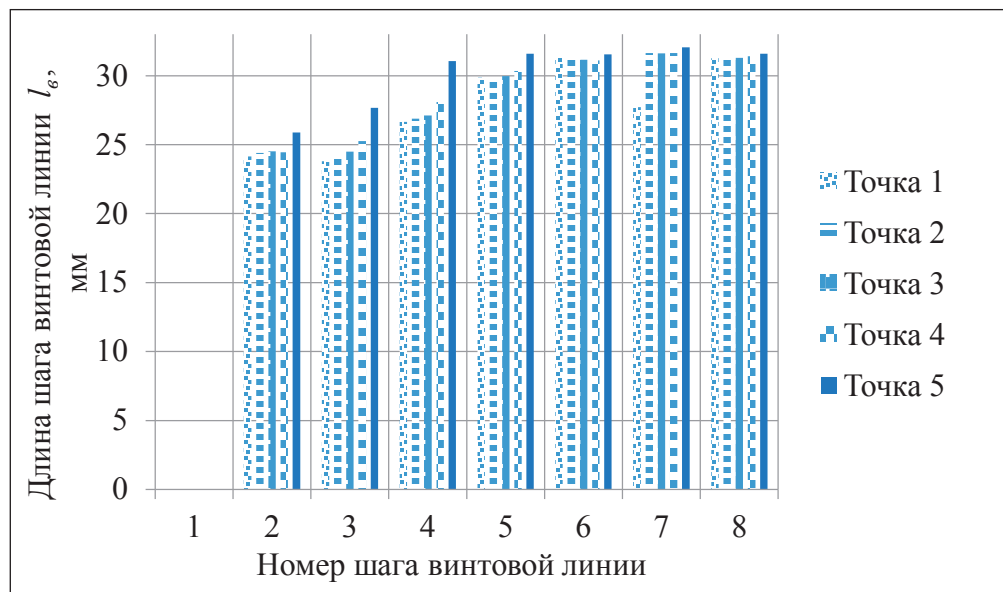


Рис. 2.14. Длина шага винтовой линии вдоль очага деформации

Анализ результатов, представленных в табл. 2.3 и на рис. 2.15, показал, что наибольшее относительное обжатие наблюдается на втором шаге винтовой линии, в сечении пережима валков. Далее по мере увеличения номера шага винтовой линии происходит уменьшение величины относительного обжатия. С пятого по восьмой шаг винтовой линии относительное обжатие по радиусу заготовки  $\frac{\Delta r}{r_0}$  остается

практически неизменным. На этих шагах производится калибрование заготовки по диаметру.

Из теории известно, что увеличение ширины контактной поверхности приводит к увеличению глубины проникновения пластической деформации. При этом неоднородность деформации по сечению заготовки уменьшается. Для оценки значения ширины контактной поверхности по длине очага деформации был введен безразмерный параметр  $\frac{r_0}{b}$ .

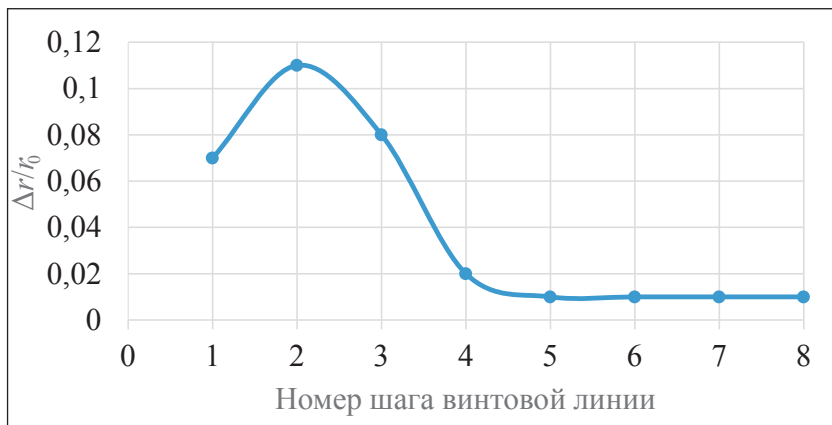
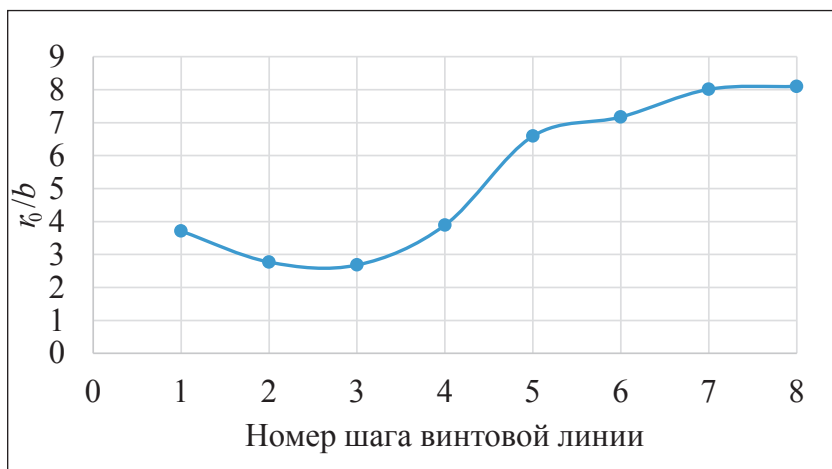


Рис. 2.15. Изменение относительного обжатия вдоль очага деформации

Из рис. 2.16 видно, что наименьшее значение отношения радиуса заготовки к ширине контактной поверхности  $\frac{r_0}{b}$  соответствует сечению пережима. На следующих шагах происходит уменьшение относительного обжатия заготовки и ширины контактной поверхности (см. табл. 2.4). При изучении процесса кузнечной протяжки В.Л. Колмогоров установил, что при  $\frac{r_0}{b} \geq 4,37$  деформация локализуется на поверхности заготовки и не проникает до ее оси.

Рис. 2.16. Изменение параметра  $\frac{r_0}{b}$  вдоль очага деформации

Из рис. 2.16 видно, что начиная с 5 шага, когда происходит калибрование заготовки по диаметру, деформация локализуется в приконтактном слое заготовки и валков, что приводит к образованию утяжин на концах заготовки (рис. 2.17). Утяжина на заднем конце заготовки приводит к образованию кольцевых отслоений в процессе прошивки, при обрыве которых повышается брак по вмятинам на поверхности труб. Таким образом, можно сделать вывод о том, что следует изменить действующую калибровку на ТПА-80 так, чтобы деформация охватывала весь очаг деформации и проникала на всю глубину заготовки.

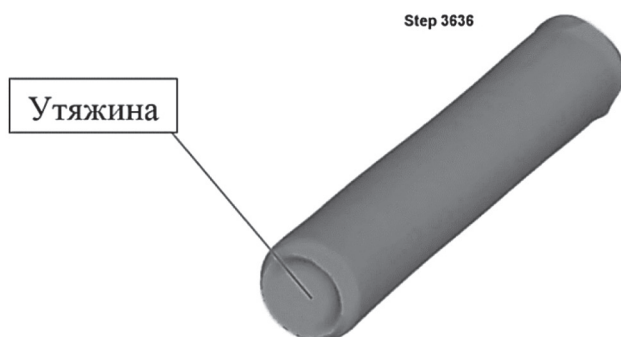


Рис. 2.17. Утяжина на заднем конце заготовки

В результате была разработана методика исследования деформированного состояния при винтовой прокатке. В ходе исследования было установлено, что степень деформации по сечению заготовки распределяется неравномерно. Значение суммарной степени деформации уменьшается от поверхности заготовки к ее оси. Наибольшее относительное обжатие заготовки в локальном очаге деформации наблюдается в сечении пережима. В этом же сечении ширина контактной поверхности и глубина проникновения пластической деформации имеют наибольшие значения. Начиная с пятого шага винтовой линии деформация локализуется на поверхности заготовки, что приводит к формированию утяжин на концах заготовки, являющихся причиной отрыва кольцевых отслоений при прошивке, и приводит к увеличению объема брака по вмятинам на поверхности труб. Высказана рекомендация, согласно которой при расчете калибровки валков необходимо профиль валка подбирать таким образом, чтобы деформация проникала на всю глубину заготовки по всей длине очага деформации.

## 2.3. Деформированное состояние металла при винтовой прошивке\*

### 2.3.1. Постановка задачи компьютерного моделирования и планирование вычислительного эксперимента

Исследование формоизменения и деформированного состояния металла при винтовой прошивке осуществлялось в программном комплексе DEFORM (лицензия кафедры обработки металлов давлением УрФУ), основанном на методе конечно-элементного моделирования. Твердотельные модели валков, линейек и оправки прошивного стана с грибовидными валками (рис. 2.18) создавались в программе твердотельного 3D моделирования — SolidWorks (лицензия кафедры обработки металлов давлением УрФУ). Калибровка валков и линейек, коэффициент овализации заготовки в сечении пережима принималась действующими для прошивного стана ТПА (6–12) ПАО «СевТЗ». Позиционирование валков производилось с учетом значений угла подачи  $\beta = 9^\circ$  и угла раскатки  $\delta = 12^\circ$ . Расстояние между валками в пережиме составляло  $d_{\Pi} = 272$  мм, а между линейками —  $a_{\Pi} = 296$  мм; выдвижение оправки за пережим —  $c_{\Pi} = 100$  мм.

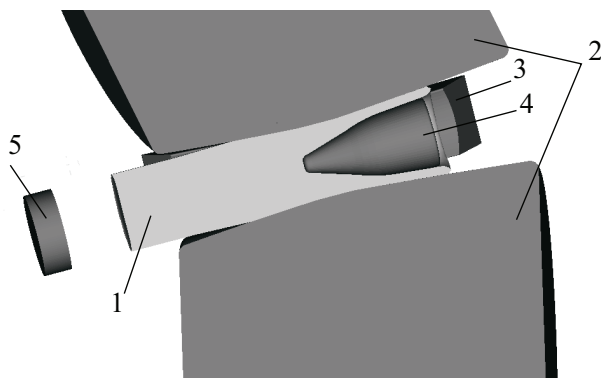


Рис. 2.18. Разрез модели прошивного стана в DEFORM:

1 — заготовка; 2 — валки; 3 — линейки; 4 — оправка; 5 — толкатель

Диаметр заготовки равен 290 мм. Частота вращения валков равна  $n = 30$  об/мин. В качестве материала заготовки была выбрана сталь 45

\* Выполнено совместно с В. А. Топоровым.



для моделирования процессов горячей деформации при температурах 900–1200 °С. Граничные условия для температурной задачи формулируются как граничные условия третьего рода: тепловой поток равен  $q = \alpha_i \cdot \Delta\theta$ , где  $\alpha_i$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К);  $\Delta\theta$  — разность температур, °С. Условия теплопередачи от заготовки воздуху и инструменту определены значениями  $\alpha_i$ , соответственно равными 0,02 и 5 Вт/(м·К). На поверхностях контакта заготовки с инструментом задан закон трения по Зибелю:  $\tau = \psi \cdot \tau_s$ , где  $\tau$  — напряжение трения, МПа;  $\psi$  — показатель трения;  $\tau_s$  — сопротивление деформации материала на сдвиг. Показатель трения на контактной поверхности с валками принят равным  $\psi = 1$ , с оправкой —  $\psi = 0,2$ , а с линейками —  $\psi = 0,4$ . В нестационарной стадии процесса осевая составляющая скорости заготовки определялась скоростью толкателя, а тангенциальная — окружной скоростью валков. В стационарной стадии процесса прокатки толкатель не использовался.

### 2.3.2. Анализ результатов исследования

При исследовании процесса винтовой прошивки целевыми функциями вычислительного эксперимента являлись: размеры локального и общего очагов деформации, относительное частное обжатие ( $\Delta r/r$ ), отношение радиуса заготовки к ширине контактной поверхности ( $r/b$ ), значение коэффициента овализации заготовки ( $\xi$ ). При винтовой прокатке в поперечном сечении очага деформации наблюдается образование «наплыва» металла перед валком, вызванное увеличением радиуса заготовки от  $r_0$  до  $r_1$  при входе в локальный очаг деформации. Приняв значение радиуса заготовки в выходном сечении за  $r_{10}$ , получим абсолютное частное обжатие на шаге винтовой линии  $\Delta r = r_1 - r_{10}$  (см. рис. 2.19, а). Количество локальных очагов деформации, характеризующих взаимодействие валков и заготовки, определяется длиной шага винтовой линии ( $l_i$ ), которая рассчитывается для шести частиц металла с различной радиальной координатой в исходном состоянии (см. рис. 2.19, б). В продольном сечении очаг деформации имеет три характерных участка: первый — от входа в очаг деформации до носка оправки; второй участок характеризуется обжатием гильзы на оправке; третий участок характеризуется раскаткой гильзы без оправки до выхода из очага деформации.

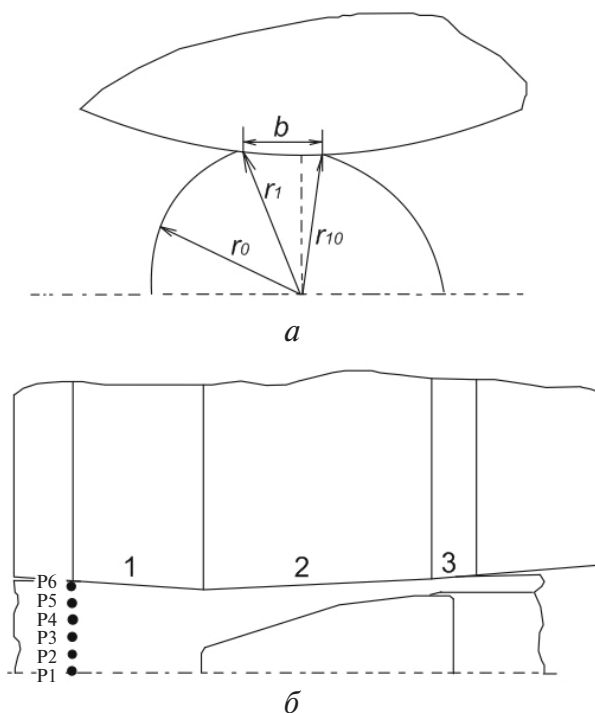


Рис. 2.19. Схема очага деформации при винтовой прошивке в поперечном —  $a$  и продольном направлениях —  $b$

На рис. 2.20 показано изменение параметров  $\Delta r/r$ ,  $\xi$  и  $r/b$  по длине очага деформации в зависимости от номера шага винтовой линии. Коэффициент овализации был найден как отношение расстояния между контактами на поверхности заготовки с линейками к расстоянию между контактами с валками в каждом рассматриваемом сечении, соответствующему шагу винтовой линии частицы P6 (рис. 2.19, б).

Для относительного частного обжатия ( $\Delta r/r_0$ ) и коэффициента овализации ( $\xi$ ) зависимости от номера шага винтовой линии имеют одинаковый характер. На входе в очаг деформации они имеют минимальные значения, затем увеличиваются до максимального значения в переходе валков (восьмой номер шага винтовой линии), а к сечению выхода из очага деформации уменьшаются до минимальных значений. В переходе относительное частное обжатие  $\Delta r/r_0 = 0,12$ , а коэффициент овализации  $\xi = 1,09$ .

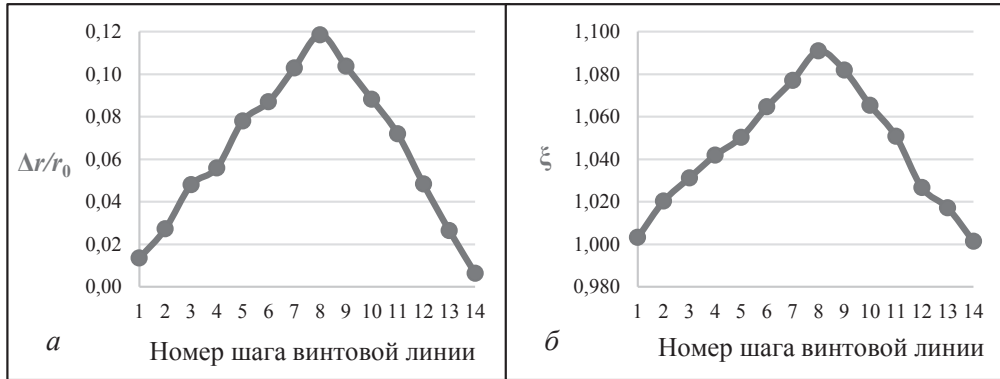


Рис. 2.20. Изменение относительного обжатия  $\Delta r/r_0$  — а, коэффициента овализации  $\xi$  — б и параметра  $r_0/b$  — в по шагам винтовой линии

На рис. 2.21 представлены результаты расчета длины каждого шага винтовой линии  $l_p$ , по которым частицы P1...P6 перемещаются в очаге деформации.

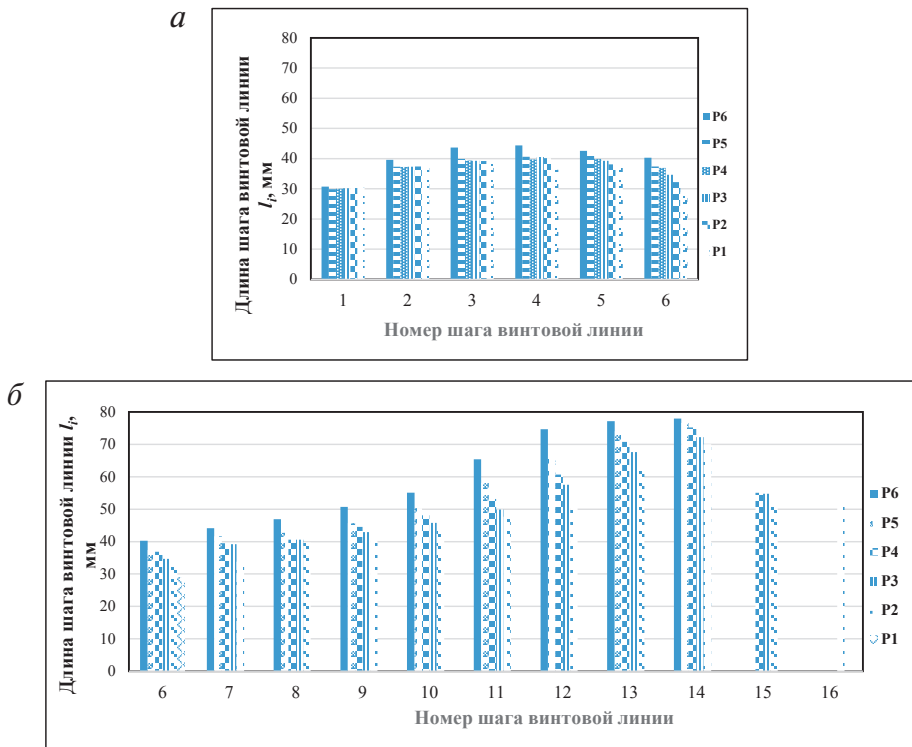


Рис. 2.21. Длина шага винтовой линии для материальных частиц P1...P6 на первом — а, втором и третьем — б участках очага деформации

На первом участке до третьего шага включительно выполняется гипотеза плоских сечений, однако осевая составляющая скорости плоского сечения точки Р6 больше, чем у точек Р1...Р5. На четвертом (см. рис. 2.21, а) шаге вблизи носка оправки внешние слои заготовки деформируются более интенсивно и «обгоняют» внутренние слои в осевом направлении движения заготовки, а частица Р1 перемещается по оси прокатки и останавливается перед носком оправки (шестой шаг винтовой линии).

На рис. 2.22 представлены графики изменения степени деформации  $\epsilon_u$  частиц Р1...Р6 на трех участках очага деформации.

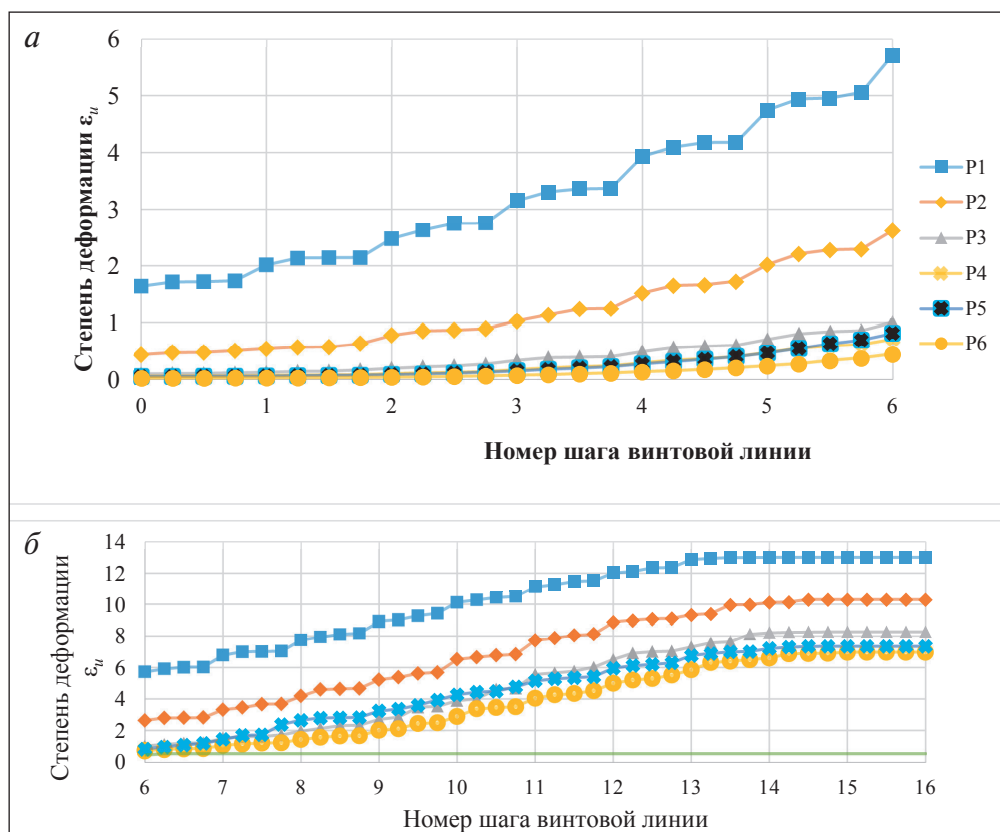


Рис 2.22 Степень деформации  $\epsilon_u$ , накопленная частицами Р1... Р6 на первом — а, втором и третьем участках — б

На первом участке очага деформации частица Р6 совершает шесть шагов, т. е. испытывает деформацию под каждым валком по три раза,

максимальная степень деформации достигает  $\varepsilon_u^1 = 5,69$  (в приконтактной области), что говорит о высокой интенсивности деформации при винтовой прокатке. Внешние слои металла деформируются более интенсивно, чем внутренние — степень деформации частицы Р6 в приконтактной области ( $\varepsilon_u^6 = 5,69$ ) значительно превышает значение степени деформации частицы Р1 в центральной зоне заготовки ( $\varepsilon_u^1 = 0,5$ ) (см. рис. 2.22, а). При обжатии гильз на оправке деформация выравнивается по толщине стенки и в выходном сечении очага деформации степень деформации частицы Р6 имеет значение  $\varepsilon_u^6 = 13$ , а частиц Р3 и Р2 —  $\varepsilon_u^3$  и  $\varepsilon_u^2 \approx 7,8$  (см. рис. 2.22, б).

Видно, что абсолютная разница максимального и минимального значений степени деформации по толщине стенки гильзы как в конце первого участка, так и в сечении выхода металла из валков остается практически неизменной —  $\Delta\varepsilon_u \approx 5$ .

Теоретическое исследование процесса винтовой прошивки позволило разработать методику оценки формоизменения заготовки в очаге деформации. Используя методику, были получены распределения относительного обжатия заготовки ( $\Delta r/r$ ), коэффициента овализации ( $\xi$ ) и отношения радиуса заготовки к ширине контактной поверхности ( $r/b$ ) для каждого номера шага винтовой линии. Были установлены закономерности изменения частного обжатия ( $\Delta r/r$ ) и коэффициента овализации ( $\xi$ ) от номера шага винтовой линии. На входе в очаг деформации они имеют минимальные значения, затем увеличиваются до максимального значения ( $\Delta r/r = 0,12$  и  $\xi = 1,09$ ) в переходе валков, а к сечению выхода из очага деформации уменьшаются до минимальных значений. Результаты расчета параметра  $r/b$  показали, что во входном сечении очага деформации отношение  $r_{0i}/b_i > 4,37$ , следовательно, деформация не проникает в глубь заготовки, локализуясь в приконтактной области металла. При винтовой прошивке внешние слои заготовки деформируются более интенсивно и «обгоняют» внутренние слои в осевом направлении движения заготовки. Результаты расчета степени деформации для частиц с различной радиальной координатой показали, что неравномерность деформации, сформированная во входном сечении очага деформации, не устраняется при последующем обжатии заготовки на оправке и безоправочной прокатке гильзы: абсолютная разница максимальной и минимальных значений степени деформации как в конце первого участка, так и в сечении выхода металла из валков одинакова —  $\Delta\varepsilon_u \approx 5$ .

## 2.4. Компьютерное моделирование формоизменения заднего конца заготовки при обжатии и прошивке

На трубопрокатном агрегате ТПА-80 цеха Т-3 ПАО «Синарский трубный завод» производят горячекатаные трубы диаметром 28–83 мм, с толщиной стенки 2,8–10,0 мм из углеродистых, низколегированных и легированных марок сталей. С целью внедрения технологии изготовления труб из непрерывно-литой заготовки в линии ТПА-80 был установлен трехвалковый стан и освоена технология радиально-сдвиговой прокатки (РСП). При освоении новой технологии возникла проблема, связанная с образованием утяжин на концах заготовки после РСП, являющихся причиной отрыва кольцевых отслоений при прошивке (рис. 2.23) и увеличения объема брака по вмятинам.

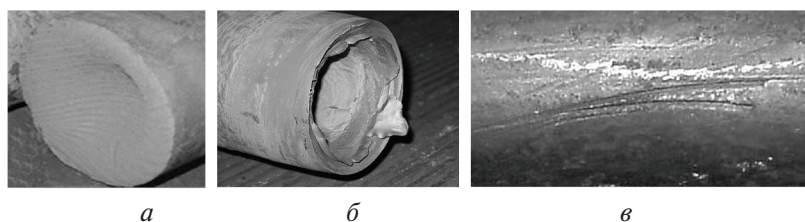


Рис. 2.23. Образование утяжины на заготовке — *а*, кольцевое отслоение на гильзе — *б*, характерный вид дефекта «вмятина» на наружной поверхности труб — *в*

### 2.4.1. Компьютерное моделирование процесса обжатия заготовки на трехвалковом обжимном стане

Постановка задач компьютерного моделирования производилась с учетом выбранных при планировании вычислительного эксперимента технологических параметров процесса обжатия: угол раскатки  $\delta = 12^\circ$ ; скорость вращения валков  $n = 100$  об/мин. Температура инструмента принята постоянной и равной  $150^\circ\text{C}$ .

Геометрия заготовки, а также толкателя была создана с помощью средств самой программы Deform. Твердотельная модель валков обжимного стана выполнена в программе Компас-3D, а затем импортирована в программу конечно-элементного моделирования путем сохранения в файл с расширением «*stl*» (см. рис. 2.24).

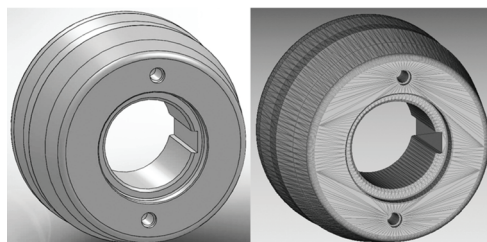


Рис. 2.24. Твердотельная модель вала обжимного стана до (слева) и после (справа) триангуляции

Заготовка и инструмент были спозиционированы друг относительно друга с учетом осевой симметрии расположения валков относительно оси заготовки, а также с учетом углов подачи и раскатки. Сведение валков производилось таким образом, чтобы на выходе из стана было обеспечено получение заготовки диаметром 120 мм.

Из библиотеки материалов для заготовки была выбрана сталь, аналогичная Ст45 по российским стандартам, — AISI-1045, при этом использовалась вязкопластическая среда. Температура нагрева заготовок согласно промышленным данным составила 1200 °С.

Длина заготовки  $l_3 = 400$  мм была принята минимальной, но достаточной для формирования полного очага деформации. Характерный размер элемента сетки в очаге деформации был принят равным 3 мм, что соответствует 370000 конечных элементов на заготовке длиной 400 мм и диаметром 150 мм. При этом был выбран тип сетки «абсолютная». В этом случае точность расчетов обеспечивается увеличением количества элементов в случае необходимости и сохранением их размеров в заданном диапазоне.

Решение задач компьютерного моделирования произведено с учетом теплопередачи от заготовки к валкам, к толкателю и в окружающее пространство в процессе прокатки и паузы, необходимой для моделирования охлаждения заготовки перед обжимным станом.

Граничные условия для температурной задачи были сформулированы как граничные условия третьего рода:  $q = \alpha \cdot \Delta\theta$ , где  $q$  — плотность теплового потока на граничной поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta\theta$  — разность температур, °С. Для границ «заготовка — воздух» и «заготовка — валок» коэффициент теплоотдачи принят в соответствии с рекомендациями, представленными в программе Deform, соответственно равными 0,02 и 5 Вт/(м<sup>2</sup>·К).



Взаимодействие заготовки с инструментом было описано законом трения по Зибелю:  $\tau = \psi \cdot \tau_s$ , где  $\tau$  — напряжение трения, МПа;  $\psi$  — показатель трения;  $\tau_s$  — сопротивление деформации металла при сдвиге, МПа. Согласно рекомендациям Deform-3D показатель трения принят равным  $\psi = 0,7$ . Модель трехвалкового стана винтовой прокатки в программе Deform представлена на рис. 2.25.

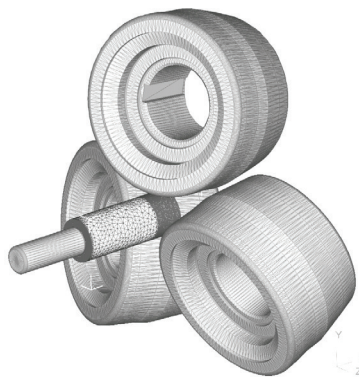


Рис. 2.25. Модель обжимного стана в Deform-3D

Следует отметить, что геометрические характеристики очага деформации, кинематические и температурные начальные и граничные условия, а также определяющие соотношения деформируемого тела корректируются на каждом шаге связанной краевой задачи. Время каждого шага принято равным 0,01 с. На каждом шаге, полагая неизменными геометрию очага деформации и свойства деформируемой среды в пределах каждого элемента, а также кинематические и температурные условия на протяжении всего времени шага, из условия минимума функционала определяется новое поле скоростей. По найденному полю скоростей определяются поля приращения перемещений, накопленной деформации, напряжений, приращения работы пластической деформации и температуры. После корректировки геометрии очага деформации, уточнения граничных и начальных условий аналогичным образом определяется пластическое состояние металла на следующем шаге деформации.

Разрез заготовки, полученной в ходе компьютерного моделирования процесса обжатия, представлен на рис. 2.26. Из рис. 2.26 видно, что на заднем и переднем концах заготовки происходит формирование утяжин, что согласуется с результатами промышленных наблюдений.





Рис. 2.26. Разрез заготовки, полученной в ходе компьютерного моделирования процесса обжатия:

$D_3$  — диаметр заготовки;  $D_y$  — диаметр утяжины;  $H_y$  и  $h_y$  — глубина утяжины на переднем и заднем концах заготовки соответственно;  $h_k$  — длина наружной конической части заготовки;  $h_n$  — ширина неровности заднего конца заготовки

### 2.4.2. Компьютерное моделирование процесса прошивки

Для исследования формоизменения было проведено компьютерное моделирование процесса прошивки заготовки, обжатой на трех-валковом стане винтовой прокатки (п. 2.3.1).

Твердотельные модели валков, оправки, линейек прошивного стана (рис. 2.27, а–в) были созданы в графической программе Компас-3D. Для импортирования твердотельных моделей в программный комплекс DEFORM-3D они были сохранены в файлы с расширением «*stl*». Моделирование процесса прошивки осуществлялось при углах подачи  $\beta = 12^\circ$  и раскатки  $\delta = 8^\circ$ . Число оборотов валков 100 об/мин.

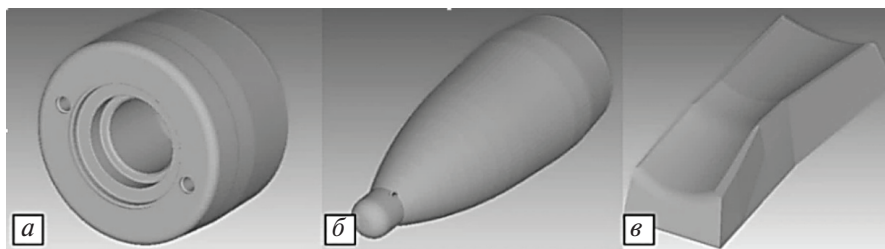


Рис. 2.27. Твердотельные модели инструментов прошивного стана:

а — валок, б — оправка, в — линейка

Диаметр прокатываемой заготовки на прошивном стане согласно технологии производства труб на ТПА-80 ПАО «СинТЗ» равен 120 мм. Твердотельные модели заготовки и толкателя были созданы с помо-

щью инструмента «Примитивы» в препроцессоре Deform. Позиционирование заготовки осуществляется относительно валков, а толкателя — относительно заготовки. Для сокращения времени расчетов длину заготовки приняли минимальной. Для этого была поставлена пробная задача прошивки заготовки и непосредственно в программе Deform была измерена длина очага деформации, которая составила  $l_{\text{од}} = 215$  мм. Исходя из этого длина заготовки задавалась равной  $l_3 = 300$  мм. Температура нагрева заготовок принята равной  $1180^\circ\text{C}$ . В качестве материала заготовки была выбрана сталь Ст45 — аналогом этой стали в программе Deform является сталь AISI-1045. Согласно библиотеке материалов Deform эта сталь применима для моделирования процессов горячей деформации при температурах  $900\text{--}1200^\circ\text{C}$ .

Температуру инструмента задали равной  $150^\circ\text{C}$ , а температуру окружающей среды (воздуха) —  $20^\circ\text{C}$ . Решение задач компьютерного моделирования провели с учетом теплопередачи от заготовки к валкам, к толкателю и в окружающее пространство в процессе прокатки и технологической паузы, необходимой для моделирования охлаждения заготовки перед прошивным станом.

Граничные условия для температурной задачи были сформулированы как граничные условия третьего рода. На поверхностях контакта заготовки с инструментом кроме условий теплопроводности задан закон трения по Зибелю. Показатель трения между валком и заготовкой приняли равным  $\psi = 1$ , между оправкой и заготовкой —  $\psi = 0,2$ , между линейкой и заготовкой —  $\psi = 0,4$ .

Следует отметить, что геометрические характеристики очага деформации, кинематические и температурные начальные и граничные условия, а также определяющие соотношения деформируемого тела корректируются на каждом шаге связанной краевой задачи. Время одного шага  $0,0002$  с. Сохранение результатов решения производилось через каждые 10 шагов. На каждом шаге, полагая неизменной геометрию очага деформации и свойства деформируемой среды в пределах каждого элемента, а также кинематические и температурные условия на протяжении всего времени шага, из решения пластической задачи определяется новое поле скоростей.

При решении краевой задачи методом конечных элементов использовался прямой метод итераций в совокупности с алгоритмом сопряженных градиентов. Данный подход обеспечивает скорость ре-

шения, большую, чем при использовании метода Ньютона — Рафсона (усовершенствованный метод касательных) в совокупности с алгоритмом разреженных матриц, однако скорость схождения решения при этом значительно ниже. Для обеспечения сходимости в Deform предусмотрен автоматический переход на алгоритм Ньютона — Рафсона и метод разреженных матриц. При постановке задачи задавали абсолютную сетку с размером элемента равным 2 мм. Модель прошивного стана в программе Deform представлена на рис. 2.28.

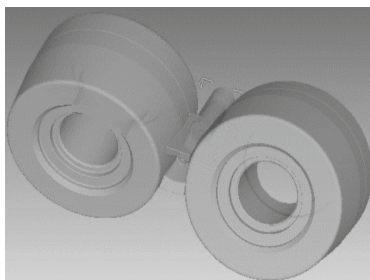


Рис. 2.28. Модель прошивного стана в Deform-3D

Из рис. 2.29 видно, что на заднем конце заготовки происходит формирование кольцевого отслоения, которое при дальнейшей прокатке может оборваться и привести к образованию вмятин на поверхности труб.

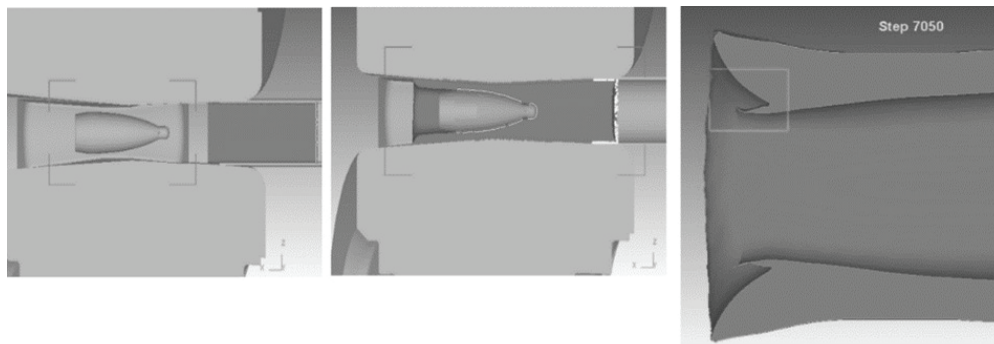


Рис. 2.29. Образование кольцевых отслоений на гильзе:  
а — 1 шаг расчета; б — 3200 шаг расчета; в — 7050 шаг расчета

### **3. Исследование формоизменения заднего конца заготовки при винтовой прокатке**

---

**О**дной из основных задач механики обработки металлов давлением является изучение закономерностей и оценка влияния калибровки инструмента, а также технологических режимов пластической обработки на формоизменение заготовки. Общеизвестным методом компьютерного моделирования технологических процессов является метод конечных элементов (МКЭ).

#### **3.1. Исследование влияния формы конца заготовки и режимов прокатки на размеры утяжины**

---

##### **3.1.1. Исследование влияния технологических параметров процесса обжатия на образование утяжин**

В ходе промышленных исследований нового технологического процесса производства труб на ТПА-80 с использованием непрерывнолитых заготовок было установлено, что наиболее распространенным видом брака являются дефекты вида «раковина — вдав», доля которых составляет более половины суммарного брака труб. Кроме того, было установлено, что образование стимулируется формированием утяжин на задних концах заготовок в нестационарных стадиях прокатки. В работе с целью нахождения оптимальных режимов обжатия, способствующих минимизации размеров утяжин и повышению качества готовой продукции, с применением физического и компьютерного моделирования, а также в ходе промышленных исследований

изучено формоизменение концевых частей заготовок в зависимости от калибровки валков обжимного стана, а также технологических параметров процесса обжатия.

Для изучения влияния на размеры образующихся утяжин относительного обжатия (диаметр) заготовки, угла подачи, времени охлаждения и исходной формы конца заготовки и калибровки валков обжимного стана осуществлялось компьютерное моделирование процесса обжатия круглых заготовок в соответствии с планом вычислительного эксперимента (табл. 3.1). Влияние каждого технологического параметра определялось путем сравнения относительных размеров утяжин, образующихся при прокатке заготовок с различными значениями выбранного параметра при прочих равных условиях. План вычислительного эксперимента, составленный из условия минимума задач, представлен в табл. 3.1. Граничные условия в программе Deform были заданы такими же, как и в п. 3.4.1.

Диаметры заготовок, прокатываемых в клети обжимного стана в условиях ТПА-80, равны 150 и 156 мм. Отношения диаметра заготовки к номинальному диаметру валка, равному 650 мм, соответственно равны:

$$\left(\frac{d_3}{D_B}\right)_1 = \frac{150}{650} = 0,23; \left(\frac{d_3}{D_B}\right)_2 = \frac{156}{650} = 0,24.$$

Таблица 3.1

**Матрица планирования вычислительного эксперимента**

№	Диаметр заготовки, мм	Угол подачи, град	Время остывания заготовки, с	Калибровка валков	Исходная форма конца заготовки
1	150	16	0	серийная	прямой торец
2	156	16	0	серийная	прямой торец
3	150	12	0	серийная	прямой торец
4	150	18	0	серийная	прямой торец
5	150	16	30	серийная	прямой торец
6	150	16	60	серийная	прямой торец
7	150	16	0	опытная	прямой торец
8	150	16	0	серийная	обточенный конец

*Примечание.* По выделенным значениям параметров производится сравнение результатов решения задач.

Согласно технической характеристике стана углы подачи могут изменяться в диапазоне от 10 до 20°. Для моделирования были выбраны углы, равные 12, 16 и 18°.

Влияние температуры заготовки на глубину утяжин исследовалось следующим образом. Первоначально была поставлена только температурная задача свободного охлаждения заготовок в течение 30 и 60 с соответственно. Согласно производственным данным начальная температура заготовки принята равной  $\theta = 1200$  °С. Далее результаты решения температурной задачи были использованы для постановки деформационной задачи. Таким образом, было произведено моделирование различной степени охлаждения поверхностных слоев металла заготовки, необходимое для повышения сопротивления деформации и сдерживания течения металла в продольном направлении.

При расчете задач компьютерного моделирования были использованы две различные калибровки валков обжимного стана — серийная и опытная. Серийная калибровка показана на рис. 3.1.

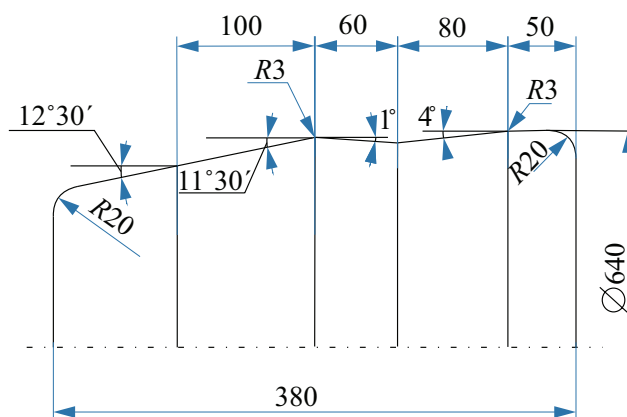


Рис. 3.1. Серийная калибровка валков обжимного стана

Опытная калибровка, разработанная на ПАО «СинТЗ», представлена на рис. 3.2. Она отличается от серийной измененными углами и длинами участков валка, а также их количеством. Применение опытной калибровки позволяет уменьшить длину и площадь контактной поверхности металла с валком.

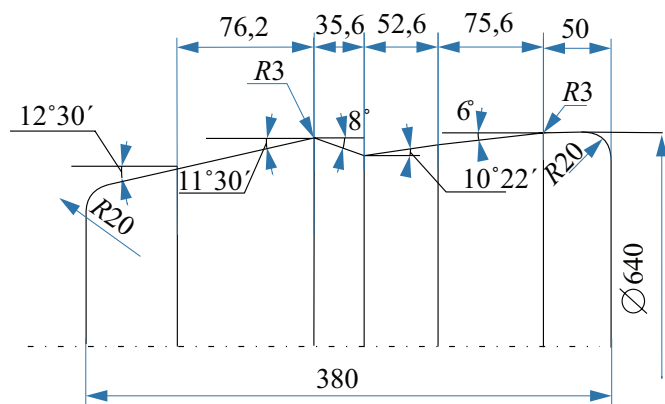


Рис. 3.2. Опытная калибровка валков обжимного стана

В работе исследовались две формы концов заготовки — перпендикулярный торец и конец заготовки, обточенный согласно рис. 3.3. В результате решения задач компьютерного моделирования были определены форма и размеры утяжин на переднем и заднем концах заготовки (см. рис. 2.26). Анализ формоизменения металла в нестационарных стадиях прокатки в зависимости от значений технологических параметров обжатия проведен для заднего конца заготовки. Исследование формирования утяжин на переднем конце не представляет интереса, т. к. образование полуколец, приводящих к появлению недопустимых дефектов на трубах, происходит только на заднем конце прошитой гильзы.

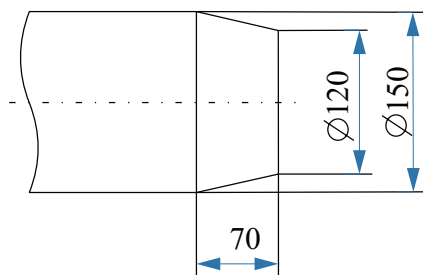


Рис. 3.3. Обточенный конец заготовки

Значения полученного диаметра заготовки, глубины утяжины, а также ширины неровности заднего края заготовки представлены в табл. 3.2. Для каждой задачи были найдены значения безразмерного параметра

$h_{\text{отн}} = \frac{2h_y - h_n}{2D_3}$ , который характеризует относительную глубину задней

утяжины. Значения указанного параметра для каждой задачи также представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Размеры утяжин на заднем конце заготовки

Величина, ед. изм.	Номер задачи в соответствии с табл. 3.1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$h_y$ , мм	31,10	42,91	34,22	27,19	28,76	27,54	27,97	12,94
$h_n$ , мм	4,65	6,61	3,31	3,02	3,37	2,18	2,16	1,03
$D_3$ , мм	118,98	117,09	118,42	117,69	118,82	118,75	119,30	120,76
$h_{отн}$	0,242	0,338	0,275	0,218	0,228	0,223	0,225	0,103

Ниже описано влияние исследуемых технологических параметров процесса прокатки на формоизменение металла на заднем конце непрерывно-литой заготовки. Сначала была изучена зависимость размеров утяжин от величины обжатия (диаметра заготовки).

При использовании заготовок диаметром 150 и 156 мм было установлено, что с ростом величины относительного обжатия происходит увеличение относительной глубины утяжины. Диаграмма, отображающая изменение размеров утяжин в зависимости от обжатия, представлена на рис. 3.4.



Рис. 3.4. Зависимость размеров утяжин от величины относительного обжатия

О влиянии угла подачи валков обжимного стана на глубину образующейся утяжины можно судить по графику, представленному на рис. 3.5. Видно, что с увеличением угла подачи происходит уменьшение размеров утяжин, а следовательно, снижается вероятность образования поверхностных дефектов на готовых трубах. Такой характер зависимости размеров утяжин от угла подачи можно объяснить уменьшением числа циклов деформации.



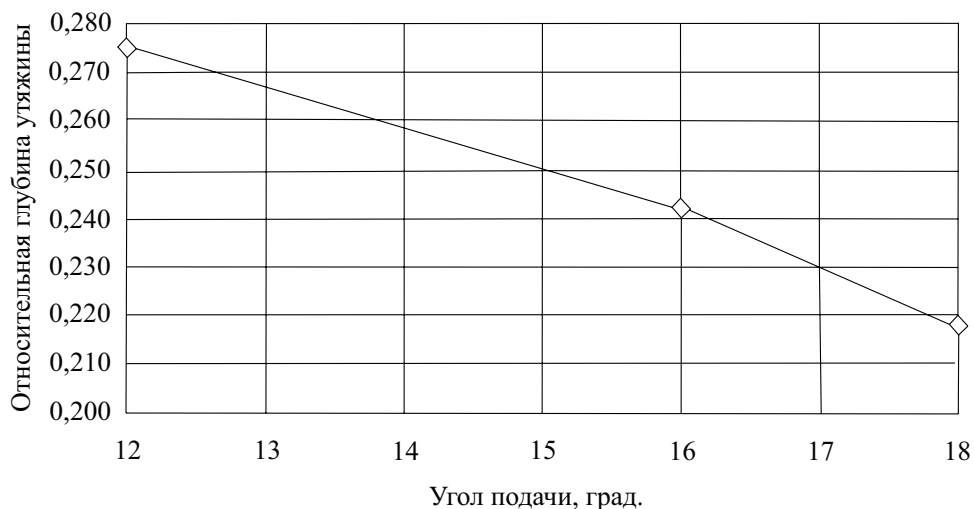


Рис. 3.5. Зависимость размеров утяжин от угла подачи

Для исследования влияния времени охлаждения заготовки перед обжимным станом на глубину образующейся утяжины использовались результаты решения температурных задач свободного охлаждения заготовок в течение 30 и 60 с. Температурные поля по продольному сечению заготовок приведены на рис. 3.6. В результате решения деформационных задач в программе Deform получены данные о размерах образующихся утяжин.

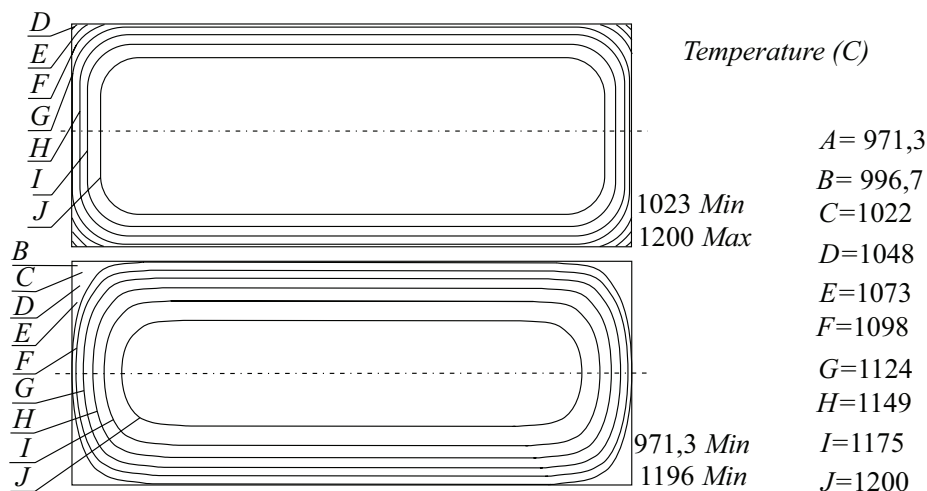


Рис. 3.6. Температурные поля по продольному сечению заготовок:

*a* — после 30 с охлаждения; *б* — после 60 с охлаждения

Таким образом, было установлено, что снижение температуры наружных слоев металла приводит к уменьшению размеров утяжин, при этом минимальные значения размеров соответствуют максимальному градиенту температур по поперечному сечению заготовки (рис. 3.7). Такой характер зависимости размеров утяжин от температуры заготовки можно объяснить тем, что во время охлаждения происходит повышение сопротивления деформации периферийных слоев металла, из-за чего они меньше удлиняются в продольном направлении.

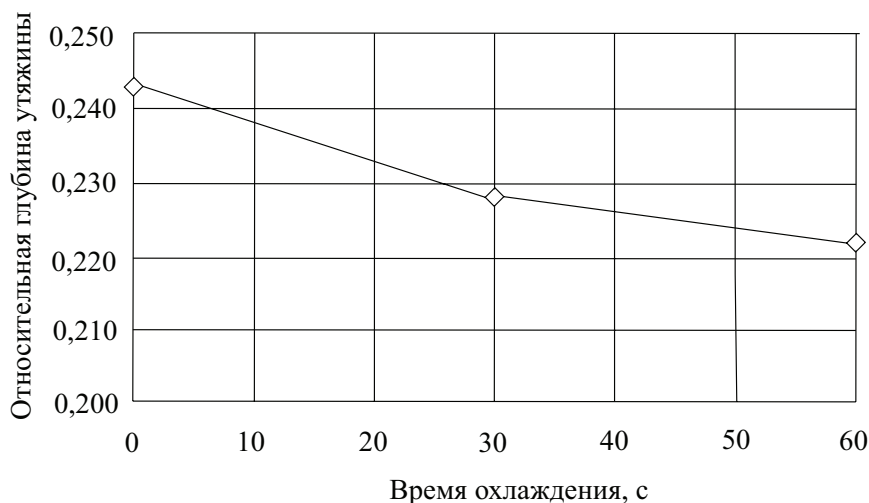


Рис. 3.7. Зависимость размеров утяжин от времени охлаждения заготовки

Таким образом, охлаждение заготовки является эффективным с точки зрения уменьшения размеров утяжины, однако при увеличении продолжительности охлаждения его влияние на формоизменение заднего конца становится меньше. С учетом возрастания нагрузок и повышения износа рабочего инструмента при низкой температуре заготовок оптимальными являются реальные условия прокатки, когда заготовка остывает на воздухе в течение 20–30 с.

При решении задач компьютерного моделирования были использованы две калибровки валков обжимного стана. Калибровки представлены на рис. 3.1 и 3.2.

Результаты моделирования процесса обжатия непрерывно-литых заготовок позволяют утверждать, что использование опытной калибровки более эффективно, т. к. относительная глубина утяжины в этом случае составляет  $h_{\text{отн}} = 0,225$ , в то время как при использовании се-

рийной калибровки  $h_{\text{отн}} = 0,242$ . Зависимость относительной глубины утяжины от калибровки валков представлена на рис. 3.8.



Рис. 3.8. Зависимость размеров утяжин от калибровки валков

В ходе наблюдений за процессом обжатия было замечено, что на заготовках, имеющих после раскроя на ножницах горячей резки смятый конец выпуклой формы, образование утяжин происходит в меньшей степени, чем на заготовках с перпендикулярным (ровным) концом. В связи с этим было исследовано влияние исходной формы конца заготовки на образование утяжин. Для этого в одной из задач была использована заготовка с обточенными концами (см. рис. 3.3). В результате моделирования определены форма и размеры образующихся утяжин. Результаты решения задач, связанных с изучением влияния формы конца заготовки, показаны на рис. 3.9.



Рис. 3.9. Зависимость размеров утяжин от используемой калибровки

Из диаграммы видно, что предварительное формоизменение заднего конца непрерывно-литой заготовки позволяет более чем в 2 раза уменьшить размеры образующихся утяжин.

Итак, в результате решения задач компьютерного моделирования с применением метода конечных элементов изучено влияние различных технологических параметров процесса обжатия на образование утяжин. Показано, что наиболее эффективным с точки зрения уменьшения размеров утяжин является предварительное формоизменение заднего конца заготовки, а также ведение процесса обжатия на повышенных углах подачи.

### 3.1.2. Исследование влияния формы конца заготовки на размеры утяжины

В ходе компьютерного моделирования (п. 3.1.1) было установлено, что предварительное профилирование заднего конца заготовки позволяет уменьшить глубину утяжины. В связи с этим было исследовано влияние исходной формы конца заготовки на глубину утяжины, образующейся при обжатии, с помощью программного комплекса Deform. Используя результаты компьютерного моделирования процесса обжатия и качественных результатов исследования формоизменения конца заготовки, были предложены четыре варианта заготовок: с плоским торцом (рис. 3.10, а); с выпуклым торцом (рис. 3.10, б); с усеченным конусом и выпуклым торцом (рис. 3.10, в; 3.10, г).

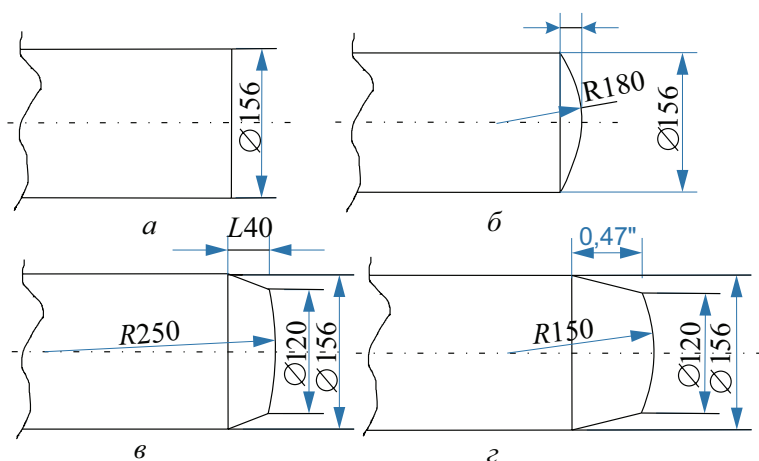


Рис. 3.10. Формы задних концов заготовок

Для моделирования процесса обжатия заготовок с четырьмя различными формами заднего конца в программе Компас-3D были созданы твердотельные модели валков, заготовки, проводки и толкателя, выполнена, а затем импортирована в программу конечно-элементного моделирования путем сохранения в файл с расширением «*stl*». На рис. 3.11 представлена модель трехвалкового обжимного стана. Для того чтобы в процессе моделирования не происходило смятия спрофилированного конца заготовки, толкатель был выполнен с углублением, полностью повторяющим контуры ее заднего конца (рис. 3.12).

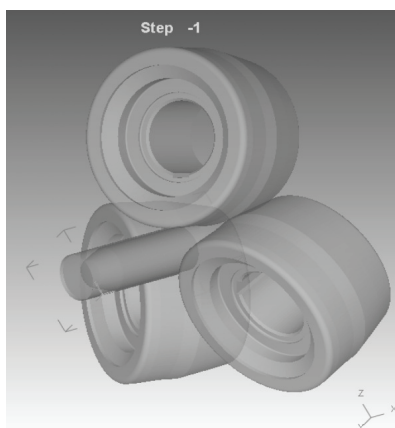


Рис. 3.11. Модель трехвалкового обжимного стана в Deform-3D

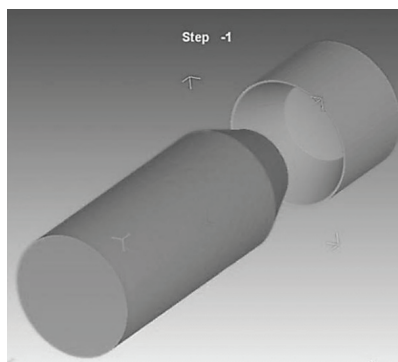


Рис. 3.12. Толкатель и заготовка

Заготовка и инструмент были спозиционированы относительно друг друга с учетом осевой симметрии относительно оси прокатки, а также углов подачи и раскатки. Валки были настроены таким образом,

чтобы в процессе прокатки происходило обжатие заготовки диаметром 156 мм до 120 мм. Граничные условия в программе Deform были заданы такими же, как в п. 2.4.1.

Анализ формоизменения металла в нестационарной стадии прокатки в зависимости от значений обжатия проведен для заднего конца заготовки. На рис. 3.13 показана заготовка с утяжиной на заднем конце.

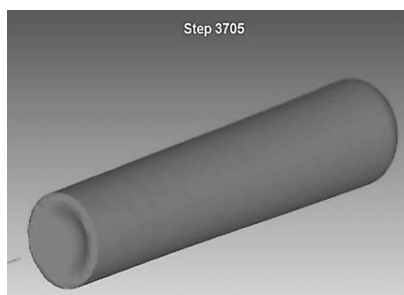


Рис. 3.13. Заготовка, полученная в ходе моделирования процесса обжатия

По окончании процесса моделирования производились замеры глубины утяжин, образовавшихся на прокатанных заготовках. Схема для измерения заднего торца заготовки после моделирования процесса обжатия представлена на рис. 3.14. Результаты измерения утяжин для четырех вариантов формы заднего конца заготовки сведены в табл. 3.3.

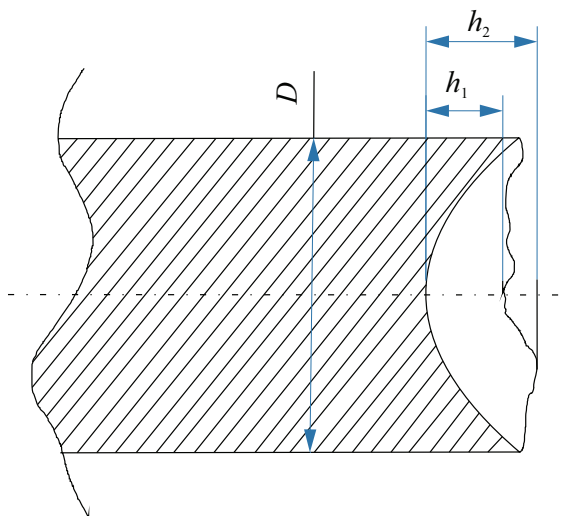


Рис. 3.14. Схема для измерения заднего торца заготовки после моделирования процесса обжатия

Таблица 3.3

**Результаты измерения утяжин для четырех вариантов формы заднего конца заготовки, полученных в ходе компьютерного моделирования**

№ варианта	Форма заднего конца	$D$ , мм	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$h_{cp}$ , мм
1	Заготовка с прямым торцом ( $R = \infty$ )	120,00	35,62	48,03	41,83
2	Заготовка с выпуклым торцом ( $L = 25$ мм, $R = 180$ мм)	120,00	22,34	25,61	23,97
3	Заготовка с усеченным конусом длиной $L = 40$ мм	120,00	15,01	18,08	16,55
4	Заготовка с усеченным конусом длиной $L = 70$ мм	120,00	10,08	13,10	11,59

Из табл. 3.3 видно, что с увеличением длины конуса  $L$  от 0 до 70 мм происходит уменьшение средней глубины утяжины от 41,83 до 11,59. Наименьшая глубина утяжины имеет место при прокатке заготовок с усеченным конусом и выпуклым торцом  $L = 70$  мм,  $R = 150$  мм.

### 3.1.3. Исследование влияния глубины утяжины на формоизменение гильзы при прошивке

Целью исследования было определение влияния формы заднего конца заготовки на формоизменение его при прошивке. Формы концевых частей заготовок соответствовали формам обжатых заготовок в ходе промышленного эксперимента на ТПА– 80 ПАО «СинТЗ» (см. п. 3.2). Глубина утяжины заднего конца заготовки, образовавшейся при обжатии литой заготовки диаметром 156 мм в зависимости от режимов профилирования заднего конца в виде усеченного конуса, составляла: 4,7 мм, 14,5 мм, 24,1 мм и 38,8 мм (см. рис. 3.15). Граничные условия в программе Deform были заданы такими же, как и в п. 3.1.2.

План вычислительного эксперимента приведен в табл. 3.4. В качестве постоянных параметров приняты: диаметр заготовки  $d_3 = 120$  мм, углы подачи —  $\beta = 12^\circ$  и раскатки —  $\delta = 8^\circ$ . Влияние формы заднего конца заготовки определено путем сравнения размеров полуколец, образующихся при прошивке заготовок с различной формой конца заготовки при прочих равных условиях.

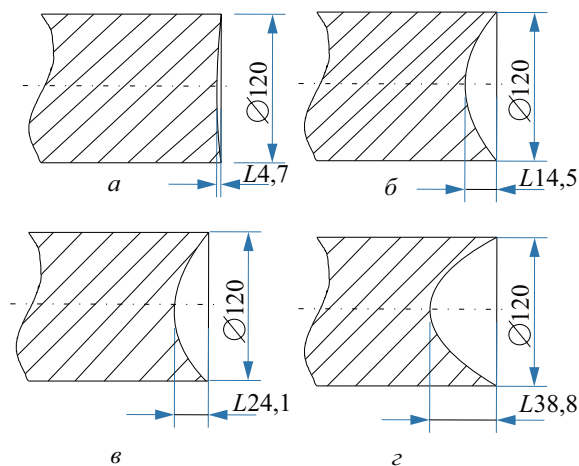


Рис. 3.15. Концевая часть заготовки перед прошивкой:  
 $a - L = 4,7$  мм;  $б - L = 14,5$  мм;  $в - L = 24,1$  мм;  $г - L = 38,8$  мм

Таблица 3.4

**Матрица вычислительного эксперимента компьютерного моделирования  
процесса прошивки**

№	Технологические параметры					
	Диаметр заготовки, мм	Угол подачи, град.	Число оборотов валков, об/мин	Угол раскатки, град.	Глубина утяжины $L$ , мм	Относительная длина утяжины $L/d_3$
1	120	12	100	8	38,8	0,323
2	120	12	100	8	24,1	0,201
3	120	12	100	8	14,5	0,121
4	120	12	100	8	4,7	0,039

Введем следующие обозначения концевой части гильзы:  $S_i$  — толщина основания отслоившегося металла гильзы,  $l_i$  — высота отслоившегося металла. Результаты расчета относительной толщины основания отслоившегося металла гильзы, полученные в ходе компьютерного моделирования,  $S' = \frac{S'_i}{d_3}$ , и промышленного эксперимента,  $S'' = \frac{S''_i}{d_3}$ , приведены соответственно в табл. 3.5 и 3.7.



Таблица 3.5

**Значения толщины основания отслоившегося металла гильзы,  
полученные в ходе компьютерного моделирования**

№	1	2	3	4
Значения средней глубины утяжины $h_{\text{ср}}$ , мм, на заднем конце заготовки перед прошивкой	38,750	24,100	14,500	4,700
$S'_{\text{max}}$ , мм	2,184	2,340	5,928	6,708
$S'_{\text{min}}$ , мм	0,780	0,780	4,368	5,304
$S'_{\text{ср}}$ , мм	1,482	1,560	5,148	6,006

Проанализировав данные табл. 3.5, можно заметить, что толщины острых вершин отслоений по третьему и четвертому вариантам формы заготовки составляют величины одного порядка 5,148–6,006, что в несколько раз превышает значения толщины острых вершин отслоения гильзы, полученные по второму и первому вариантам. Таким образом, можно предположить, что вероятность отрыва металла после прошивки обжатых заготовок с усеченным конусом и выпуклым торцом размерами  $L = 40$  мм,  $R = 250$  мм и  $L = 70$  мм,  $R = 150$  мм минимальна ввиду достаточно большой толщины отслоившегося металла, как следствие, мала вероятность образования вмятин на наружной поверхности готовых труб.

### **3.2. Проверка достоверности результатов компьютерного моделирования сопоставлением результатов вычислительного и промышленных экспериментов**

В связи с разработкой нового способа обжатия непрерывно-литой заготовки на трехвалковом стане винтовой прокатки ТПА-80 ПАО «СинТЗ» потребовалось изучить влияние формы и размеров заднего конца заготовки на глубину утяжины, образующейся при обжатии, и на образование отслоения металла на гильзе после прошивки на прошивном стане. В эксперименте прокатывались непрерывно-литые заготовки с формами задних концов, представленных на рис. 3.10. Концевые части заготовок были изготовлены обработкой резанием.

Опытные заготовки из стали 38 Г2 СФ диаметром 156 мм после нагрева подвергли прокатке на трехвалковом стане, а затем половину из них прошивке на прошивном стане. Всего прокатано восемь опытных заготовок, четыре из них были выброшены в карман после обжимного стана, а четыре гильзы — в карман после прошивного стана для исследования концевой части (рис. 3.16, *а, б*; 3.17, *а, б*; 3.18, *а, б*; 3.19, *а, б*). Схема заднего конца заготовки после обжатия с размерами утяжины для всех вариантов изображена на рис. 3.14, а результаты измерений представлены в табл. 3.6.

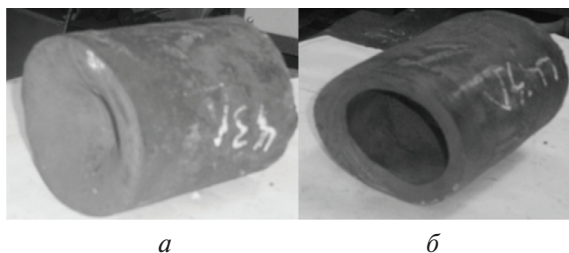


Рис. 3.16. Фото задних концов обжатой заготовки и гильзы (заготовка с плоским торцом)

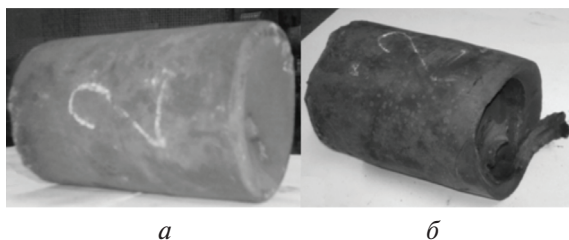


Рис. 3.17. Фото задних концов обжатой заготовки и гильзы (заготовка с выпуклым торцом размером  $L = 25 \pm 5$  мм с  $R = 180$  мм)

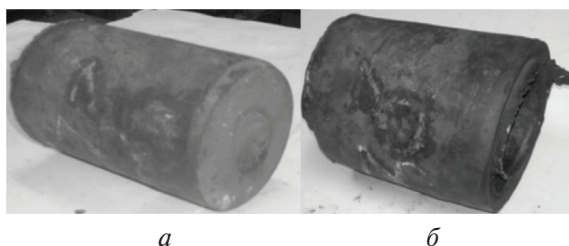


Рис. 3.18. Фото задних концов обжатой заготовки и гильзы (заготовка с усеченным конусом и выпуклым торцом размером  $L = 40 \pm 5$  мм с  $R = 250$  мм)

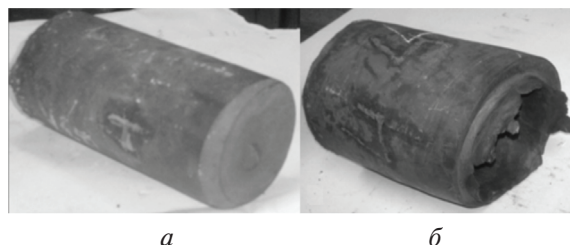


Рис. 3.19. Фото задних концов обжатой заготовки и гильзы  
(заготовка с усеченным конусом и выпуклым торцом размером  
 $L = 70 \pm 5$  мм с  $R = 150$  мм)

Таблица 3.6

**Размеры заднего конца заготовки после обжатия,  
полученных в ходе промышленных испытаний**

№ варианта	Форма заднего конца	$D$ , мм	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$h_{\text{ср}}$ , мм
1	Заготовка с прямым торцом ( $R = \infty$ )	120	33,5	44,0	38,75
2	Заготовка с выпуклым торцом ( $L = 25$ мм, $R = 180$ мм)	120	23,4	24,8	24,1
3	Заготовка с усеченным конусом и выпуклым торцом ( $L = 40$ мм, $R = 250$ мм)	120	10,5	18,5	14,5
4	Заготовка с усеченным конусом и выпуклым торцом ( $L = 70$ мм, $R = 150$ мм)	120	4,6	4,8	4,7

Главным результатом исследования является получение зависимости размеров утяжины обжатой заготовки от формы и размеров заднего конца заготовки до обжатия. На рис. 3.20 представлена зависимость глубины утяжины ( $h_1$  — минимальная глубина утяжины;  $h_2$  — максимальная глубина утяжины;  $h_{\text{ср}}$  — средняя глубина утяжины) от длины спрофилированного конца  $L$  и радиуса  $R$ .

С увеличением  $L$  от 0 до 70 мм средний размер утяжины уменьшается от 38,75 мм до 4,7 мм. Как показали результаты промышленного исследования процесса отслоения металла на заднем конце гильзы в процессе прошивки заготовки с глубиной утяжины более 18,5 мм, наблюдается уменьшение толщины кольцевого отслоения и возникает опасность его отрыва, что приводит к образованию на наружной поверхности труб вмятин. В связи с этим, используя график на рис. 3.20, можно сделать вывод, что длина спрофилированного конца должна быть более 50 мм.

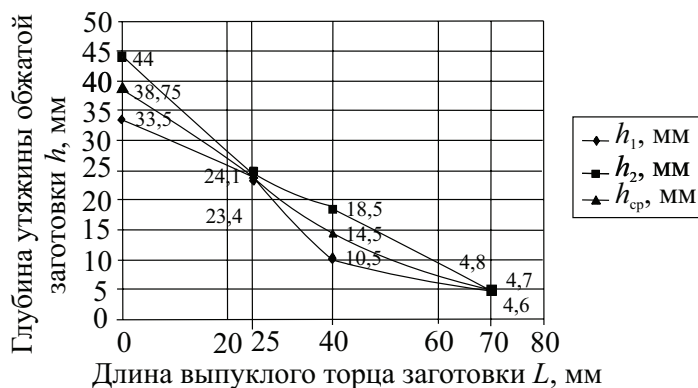


Рис. 3.20. График зависимости глубины утяжины от формы заднего конца непрерывно-литой заготовки  $\varnothing 156$  мм

По данным табл. 3.3 и 3.6 были построены графики (рис. 3.21), характеризующие среднюю глубину утяжины  $h_{cp}$  в зависимости от варианта формы заднего конца заготовки при промышленном исследовании и моделировании процесса обжатия в программе DEFORM-3D.

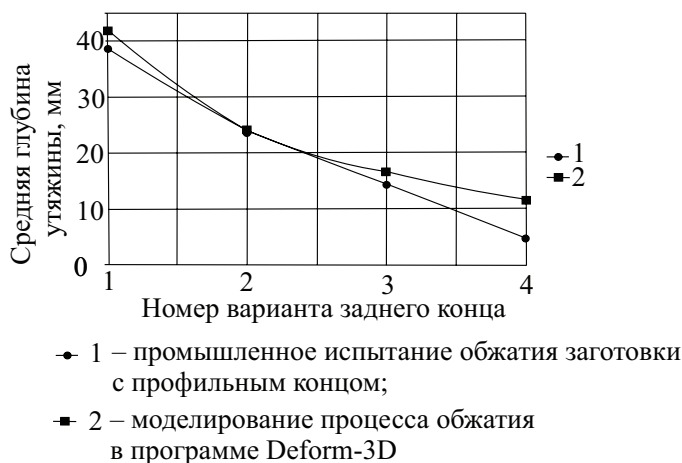


Рис. 3.21. Графики, характеризующие среднюю глубину утяжины  $h_{cp}$  в зависимости от варианта формы заднего конца заготовки при промышленном исследовании и моделировании процесса обжатия в программе Deform

Из рис. 3.21 видно, что результаты замеров глубины утяжины на практике и при моделировании процесса в программе Deform достаточно близки: разница средней глубины утяжины  $\Delta h_{cp}$  для заготовки с плоским торцом составляет 3,08 мм; для заготовки с выпуклым

торцом ( $L = 25$  мм,  $R = 180$  мм)  $\Delta h_{\text{ср}} = 0,93$  мм; для заготовки с усеченным конусом длиной  $L = 40$  мм  $\Delta h_{\text{ср}} = 2,05$  мм; для заготовки с усеченным конусом длиной  $L = 70$  мм  $\Delta h_{\text{ср}} = 6,89$  мм.

В соответствии с программой промышленного исследования четыре обжатые заготовки были подвергнуты прошивке, а полученные гильзы были обследованы. Важным является исследование кольцевого отслоения металла, образующегося на гильзе при прошивке. Схема развертки кольцевого отслоения представлена на рис. 3.22, а размеры кольцевых отслоений для четырех вариантов формы концевой части заготовок перед обжатием приведены в табл. 3.7.

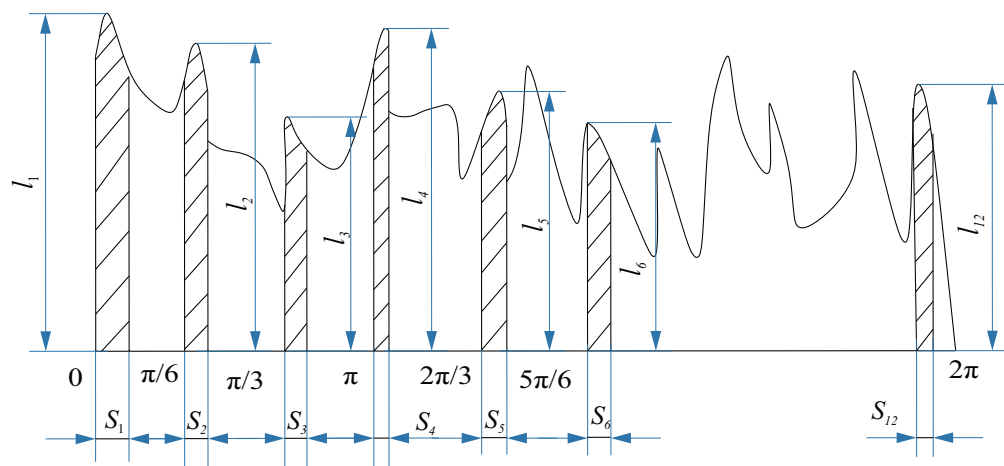


Рис. 3.22. Схема развертки кольцевого отслоения металла

Для гильзы, полученной по варианту 1 (заготовка с плоским торцом), кольцевое отслоение из-за незначительной толщины основания ( $S = 0,45\text{--}0,65$  мм) при прошивке оборвалось, а измерение осуществлено в трех точках. При прошивке обжатой заготовки, изготовленной по второму варианту (заготовка с выпуклым торцом размером  $L = 25 \pm 5$  мм с  $R = 180$  мм) образовалось полукольцо на заднем конце гильзы (см. рис. 3.17, б), которое отслаивается от внутренней поверхности металла и имеет малую толщину ( $S_{\text{ср}} = 1,11$  мм). Толщина кольцевого отслоения металла на гильзах, полученных по третьему и четвертому вариантам, составляет величины одного порядка ( $S_{\text{ср}} = 4,40$  мм — по третьему варианту и  $S_{\text{ср}} = 4,70$  мм — по четвертому варианту).

Таблица 3.7

**Значения толщины кольцевого отслоения гильзы,  
полученные в ходе промышленного эксперимента**

№	1	2	3	4
Значения средней глубины утяжины $h_{\text{ср}}$ , мм, на заднем конце заготовки перед прошивкой	38,75	24,10	14,50	4,70
$S_{\text{max}}$	0,65	1,60	4,60	5,20
$S_{\text{min}}$	0,45	0,85	4,20	4,20
$S_{\text{ср}}$	0,55	2,45	4,40	4,70

По данным табл. 3.7 был построен график зависимости толщины кольцевого отслоения от глубины утяжины (рис. 3.23). Из графика на рис. 3.23 видно, что при увеличении глубины утяжины происходит уменьшение толщины кольцевого отслоения.

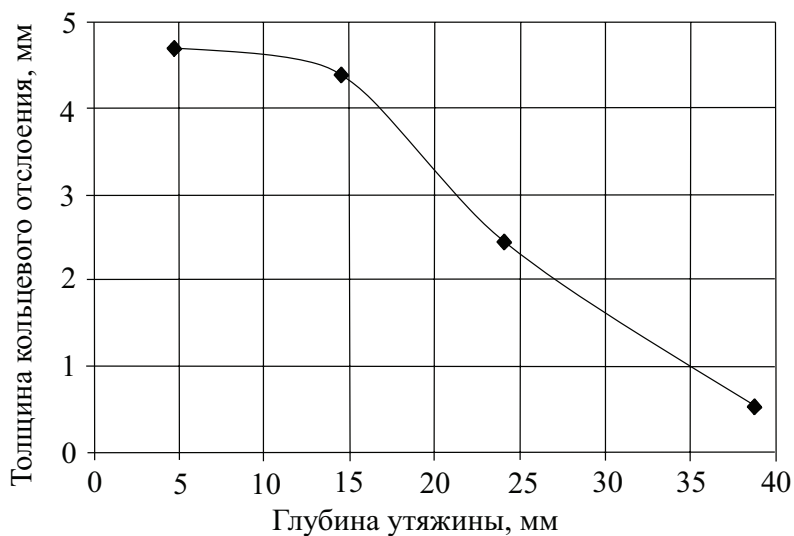


Рис. 3.23. График зависимости толщины кольцевого отслоения от глубины утяжины

На рис. 3.24 показана схема концов гильз, а в табл. 3.8 — размеры концевых частей гильз, полученных из опытных образцов:  
 $\frac{\Delta S}{S_{\text{ср}}} = \frac{S_{\text{max}} - S_{\text{min}}}{S_{\text{ср}}}$  — относительное изменение толщины стенки.

Из табл. 3.8 видно, что с увеличением длины конуса  $L$  от 0 до 70 мм овальность гильзы по диаметру ( $D_{\text{max}} - D_{\text{min}}$ ) уменьшается от 1,50 мм

до 0,50 мм, а неплоскостность заднего конца гильзы  $K$  — от 30 мм до 8 мм. Относительная эксцентрическая разностенность гильзы для опытных образцов находится в диапазоне 0,13–0,24, длина отслоившегося металла — в диапазоне 0–31 мм. Эти величины не зависят от профилирования заднего конца литой заготовки.

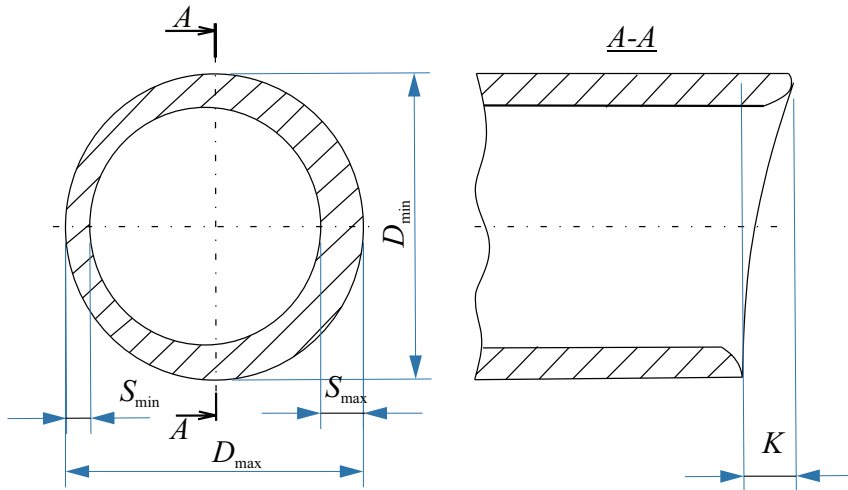


Рис. 3.24. Форма заднего конца гильзы

Таблица 3.8

Размеры концевой части гильзы

№ варианта	$L$ , мм	$D_{\min}$ , мм	$D_{\max}$ , мм	$D_{\max} - D_{\min}$ , мм	$D_{\text{ср}}$ , мм	$S_{\min}$ , мм	$S_{\max}$ , мм	$S_{\text{ср}}$ , мм	$\Delta S/S_{\text{ср}}$	$K$ , мм
1	0,00	123,80	125,30	1,50	124,50	17,70	21,10	19,40	0,17	30,00
2	25,00	122,50	123,90	1,40	123,20	17,50	22,20	19,85	0,24	15,00
3	40,00	122,10	123,40	1,30	122,75	17,70	20,20	18,95	0,13	11,00
4	70,00	122,70	123,20	0,50	122,95	17,60	21,60	19,60	0,20	8,00

Анализ размеров задних концов гильз показал, что использование заготовок, изготовленных по третьему и четвертому вариантам (см. рис. 3.10, в, г), позволяет снизить вероятность обрыва отслоившегося металла при прошивке, т. к. средняя толщина кольцевого отслоения по этим вариантам соответственно составила 4,2 и 4,7 мм. В результате исследования влияния формы конца заготовки на ее формоизменение при прокатке в трехвалковом обжимном стане сделан следующий вывод: наименьшая глубина утяжины и наибольшая тол-

щина кольцевого отслоения (4,2–5,2 мм) имеют место после прокатки заготовки с профилированным концом в виде усеченного конуса, имеющего размеры  $L = 70$  мм,  $D = 156$  мм и  $d = 120$  мм (см. рис. 3.10, з). Прокатка заготовки с длиной усеченного конуса на конце менее 40 мм приводит к уменьшению толщины отслоения металла, обрыву его при прошивке и появлению вмятин на наружной поверхности труб. По данным табл. 3.5 и 3.7 были построены графики (рис. 3.25), характеризующие среднюю относительную толщину кольцевого отслоения  $S_{\text{ср}}$  в зависимости от варианта формы заднего конца заготовки при промышленном исследовании и моделировании процесса обжатия в программе Deform.



Рис. 3.25. Сравнительный анализ средней толщины основания отслоившегося металла гильзы  $S_{\text{ср}}$ , рассчитанной теоретически и полученной в эксперименте

Из рис. 3.25 видно, что результаты измерения относительной толщины утяжины в программе Deform и в ходе промышленного эксперимента близки.



### **3.3. Физическое моделирование процесса профилирования заднего конца заготовки на трехвалковом обжимном стане**

Физическое моделирование пластической деформации — это воспроизведение некоторого реального объекта (натуры) с помощью устройства (модели), действие которого основано на тех же физических принципах, что и натуры, с целью изучения закономерности на модели и перенесения полученных результатов на натуру. Моделями могут быть, например, лабораторные установки (прессы, прокатные и волочильные станы, нагревательные устройства и т. д.), на которых осуществляется изучение реальных производственных процессов. Модели, как правило, проще и дешевле натуры; они отличаются от натуры второстепенными деталями, например, модель может быть в несколько раз меньше натуры, но основные физические принципы работы модели и натуры должны быть одинаковыми. Физическое моделирование имеет большое значение: только в условиях лаборатории можно изучить вновь создаваемые процессы или реализовать экстремальные ситуации для действующих уникальных машин. Физическое моделирование способствует поиску оптимальных режимов деформации металлов. Критериями подобия называют безразмерные коэффициенты, составленные из характерных постоянных параметров процесса, равенство которых для натуры и модели является необходимым условием их подобия.

#### **3.3.1. Рабочий проект устройства для моделирования процесса профилирования заднего конца заготовки на трехвалковом обжимном стане**

Моделирование процесса профилирования заднего конца заготовки на трехвалковом стане осуществляется на оригинальном устройстве. Устройство для моделирования процесса представлено на рис. 3.26. Образец изготавливается из скульптурного пластилина. Одна половина образца имеет круглое поперечное сечение, а другая — шестигранное. Шестигранная часть образца закрепляется в стакане 4, который соединяется с приводом вращения. Кру-

глая часть образца обжимается с помощью бойков 7, установленных во втулке 3, закрепленной в корпусе 1. Бойки (рис. 3.26) сводятся с помощью нажимного устройства 2, приводимого от рычага 8. Бойки 7 устанавливаются во втулке 3 с помощью осей. Втулка 3 имеет пазы, расположенные друг относительно друга под углом  $120^\circ$ , в которых под воздействием нажимного устройства 2 перемещаются бойки в радиальном направлении. Корпус 1 устройства закрепляется на столе неподвижно относительно привода вращения образца. Образец, закрепленный в стакане 4, устанавливается соосно приводу вращения. Боек, втулка, нажимное устройство и стакан представлены соответственно на рис. 3.27, 3.28, 3.29 и 3.30.

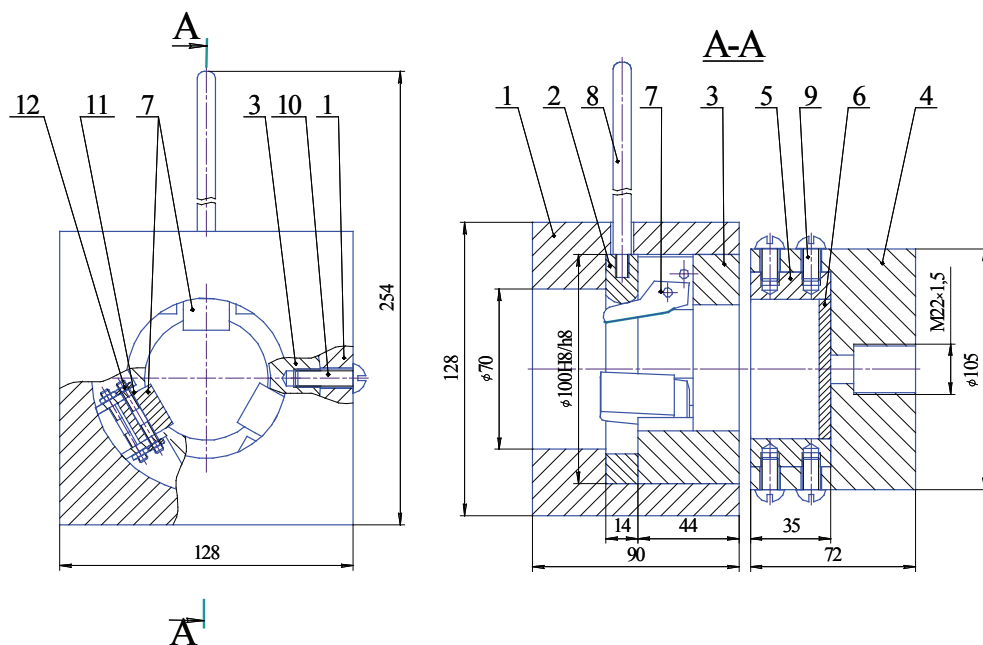


Рис. 3.26. Устройство для моделирования процесса профилирования заднего конца заготовки:

1 — корпус; 2 — нажимное устройство; 3 — втулка; 4 — стакан (для крепления заготовки на фрезерном станке); 5 — вкладыши (для закрепления заготовки в стакане); 6 — пластина; 7 — боек; 8 — рычаг; 9 — винты; 10 — винты; 11 — ось; 12 — гайка

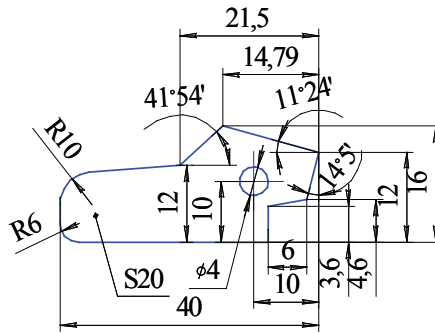


Рис. 3.27. Боек

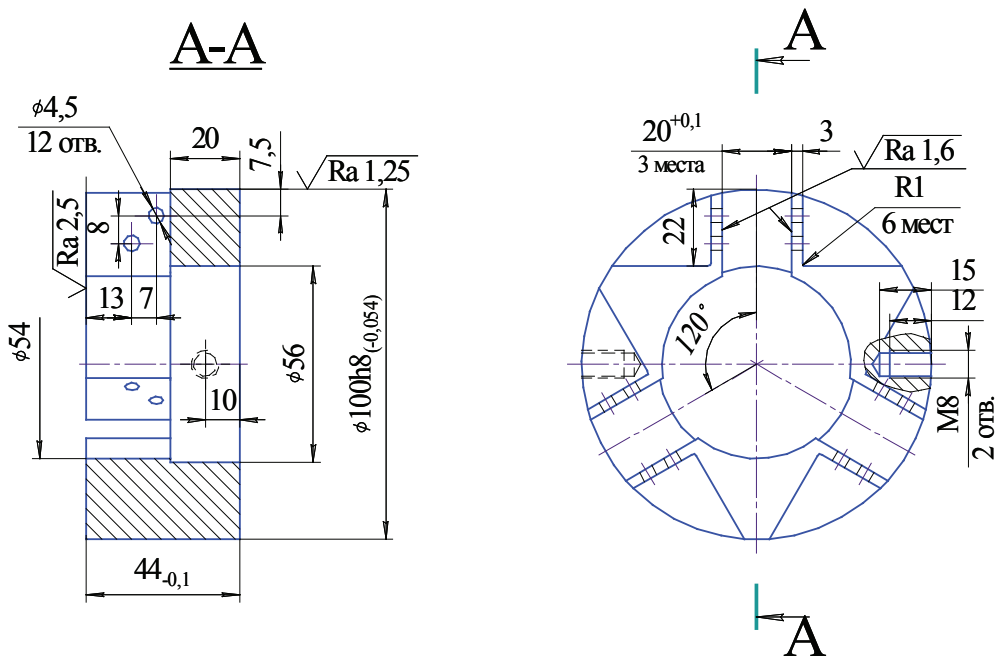


Рис. 3.28. Втулка для крепления бойков

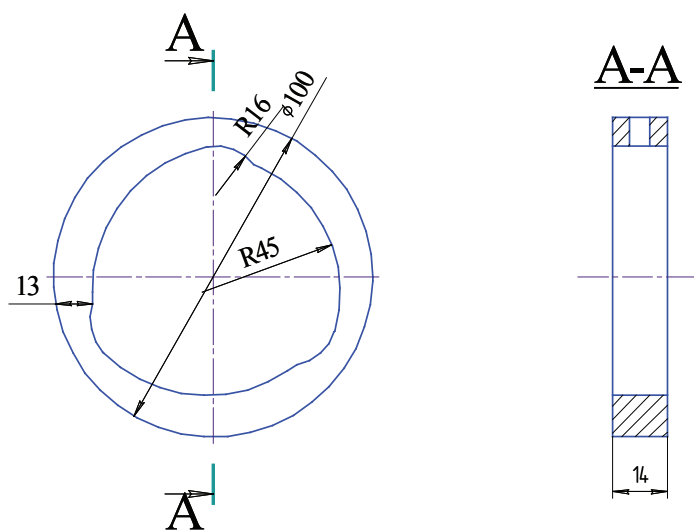


Рис. 3.29. Нажимное устройство

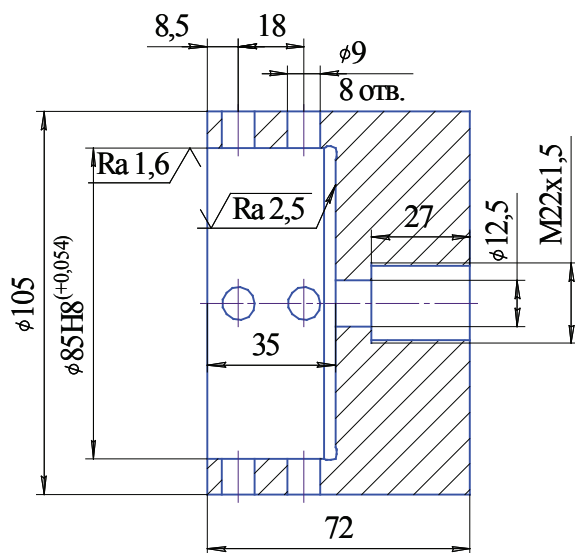


Рис. 3.30. Стакан

### 3.3.2. Планирование физического эксперимента

В ходе лабораторного эксперимента реализован способ формирования конца заготовки в виде усеченного конуса. Целью исследования являлось установление калибровки бойков (инструмента дефор-

мации) и нажимного устройства, а также режимов деформации, позволяющих формировать в процессе обжатия конец заготовки в виде усеченного конуса. Испытания проводились на установке с использованием привода фрезерного станка в лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением». При физическом моделировании образец и инструмент деформации (бойки) не имеют осевого перемещения, т. е.  $\Delta v = v_2 - v_1 = 0$  (где  $v_2$  — скорость осевого перемещения инструмента деформации,  $v_1$  — скорость осевого перемещения заготовки). Скорости поступательного движения заготовки и инструмента деформации должны быть равны  $v_2 = v_1$ , т. е.  $\Delta v = v_2 - v_1 = 0$ . Таким образом, результаты, полученные при физическом моделировании, отвечают критериям подобия модели и натуры (заготовка и вталкиватель перемещаются с одной и той же скоростью). В ходе лабораторных испытаний опробовано пять калибровок бойков. С использованием каждой калибровки бойков обжато по 2 образца. После каждого испытания производились измерения обжатого конца образца в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.31, результаты измерения представлены в табл. 3.9.

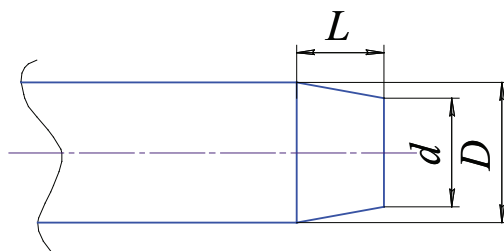


Рис. 3.31. Схема для измерения обжатого конца образца

Образец в процессе профилирования не имеет осевого перемещения, что позволяет значительно упростить конструкцию установки для физического моделирования процесса профилирования заднего конца заготовки при обжатии. Образцы были изготовлены из скульптурного пластилина в соответствии с масштабом моделирования в соотношении 1:3 к размерам непрерывно-литой заготовки. Диаметр рабочей части образца 50 мм (см. рис. 3.32), т. е.

$$m = \frac{D_{\text{заг}}}{D} = \frac{150}{50} = 3,$$

где  $D_{\text{заг}}$  — диаметр заготовки, прокатываемой на обжимном стане;  $D$  — диаметр образца. Длина концевой части  $L$  и диаметр образца на торце  $d$  определены также в масштабе 1:3. Частота оборотов образца во всех испытаниях устанавливалась равной 300 об/мин, что соответствует частоте оборотов заготовки при прокатке в обжимном стане при частоте вращения валков 75 об/мин. Время обжатия 0,5 с. В модельном эксперименте размеры бойков (см. рис. 3.32) выполнены также в масштабе 1:3.

### 3.3.3. Анализ результатов модельного эксперимента

В ходе эксперимента были опробованы 5 различных калибровок бойков и одна калибровка нажимного устройства. Перед профилированием на образцы наносилась вакуумная смазка. После обжатия концевой части образца производились измерения в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.31. Результаты измерения сведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Результаты измерения торцов образцов

№ калибровки бойков	$D$		$d$		$L$		Наличие налипания пластилина на боковую поверхность бойков
	1	2	1	2	1	2	
1	51,1	51,0	37,7	39,2	35,0	31,0	Значительное налипание
2	50,0	50,5	38,5	42,0	31,0	24,0	Значительное налипание
3	51,2	51,5	42,5	40,5	25,5	22,5	Значительное налипание
4	49,2	49,7	39,7	40,2	23,5	24,0	Сравнительно меньшее налипание
5	51,2	49,7	39,1	38,5	25,0	24,5	Налипания нет

Проведенные исследования позволили установить, что для получения в процессе профилирования на заднем конце заготовки из скульптурного пластилина усеченного конца с формой и размерами, близкими к тем, которые были установлены в п. 3.1.2 (см. рис. 3.10, *г*), с учетом масштаба моделирования 1:3, необходимо использовать калибровку бойков, представленную на рис. 3.32.

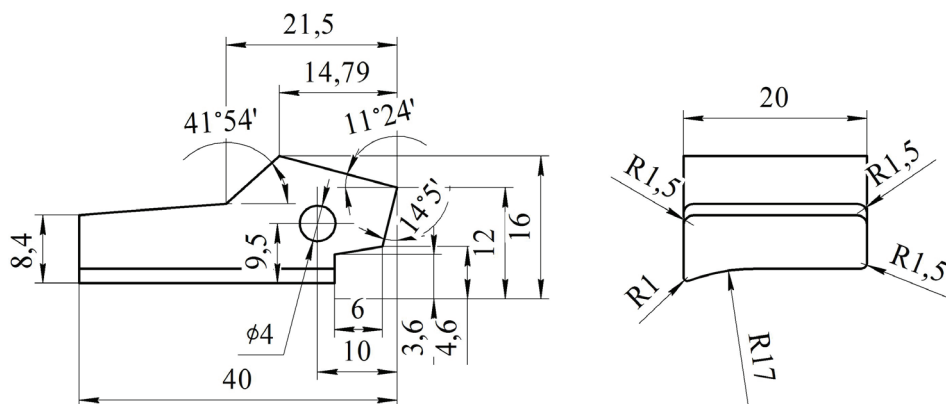


Рис. 3.32. Калибровка бойков № 5

### 3.4. Компьютерное моделирование процесса профилирования заднего конца заготовки на трехвалковом обжимном стане

Для профилирования заднего конца заготовки в виде усеченного конуса (см. рис. 3.10) процесс прокатки совмещен с радиальным обжатием специальным инструментом деформации (см. рис. 3.33). Профилирование заднего конца заготовки осуществляется с помощью инструмента деформации (бойками). Бойки в осевом направлении могут перемещаться со скоростью  $v_2$ , равной скорости перемещения заготовки  $v_1$ . Предварительное теоретическое исследование формоизменения металла при профилировании заднего конца заготовки показало, что вариант, когда  $v_1 = v_2$ , лучше, чем вариант, когда  $v_2 > v_1$ , т. к. во втором случае на границе инструмент — деформируемый металл обнаруживается кольцевая область увеличенного диаметра, т. е. наплыв металла. В дальнейшем на прошивном стане этот наплыв раскатывается, способствуя увеличению глубины утяжины и повышая вероятность образования части металла в виде полуколец, которые являются основной причиной образования на трубах дефекта «вмятина». На рис. 3.33  $v_1$  — осевая скорость перемещения заготовки;  $v_2$  — осевая скорость перемещения инструмента;  $C$  — длина спрофилированного заднего конца заготовки;  $v_r$  — скорость перемещения инструмента деформации (бойков) в радиальном направлении;  $b$  — ширина бойка. Способ об-

жатия в трехвалковом обжимном стане винтовой прокатки осуществляют следующим образом: в момент захвата заготовка 1 приобретает винтовое движение, затем, когда передний конец заготовки выходит из очага деформации, начинается процесс обжатия ее в стационарной стадии. Формирование усеченного конуса на заднем конце заготовки осуществляется во время стационарной стадии прокатки. Для этого инструменту деформации 2 сообщают радиальную  $v_r$  и осевую  $v_2$  скорости перемещения, причем осевые составляющие скорости инструмента и заготовки равны:  $v_1 = v_2$ .

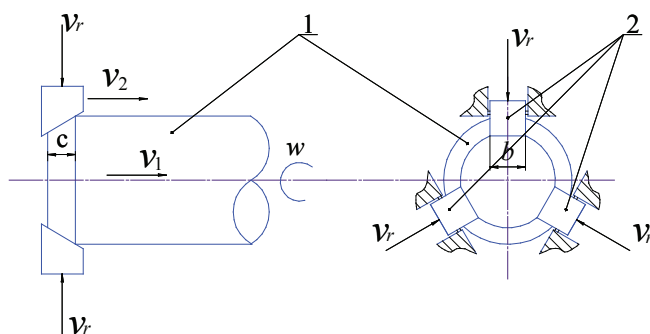


Рис. 3.33. Принципиальная схема обжатия заднего конца заготовки:

1 — заготовка; 2 — инструмент деформации (бойки)

#### 3.4.1. Компьютерное моделирование процесса профилирования конца заготовки в программном комплексе Deform-3D

Компьютерное моделирование процесса профилирования заднего конца заготовки проведено для разработки калибровки бойков и режимов деформации, которые позволили бы формировать на заднем конце заготовки усеченный конус длиной  $L = 70$  мм (рис. 3.10, з) с целью минимизации глубины утяжины на заднем конце заготовки в процессе прокатки в трехвалковом обжимном стане. Всего было опробовано 4 различных калибровки бойков. Скорость движения бойков в каждой задаче задавалась исходя из времени профилирования заднего конца заготовки в виде усеченного конуса (см. рис. 3.10, з). В табл. 3.10 представлена матрица вычислительных опытов компьютерного моделирования. Результаты измерения глубины утяжины на конце заготовки для всех 12 задач приведены в табл. 3.11. При создании твердотельных



моделей бойков для постановки задач № 1, 2 и 3 за основу была взята калибровка бойков, полученная в ходе физического моделирования, представленного в п. 3.3. При этом все размеры бойка были увеличены в 3 раза с учетом масштаба моделирования.

Таблица 3.10

Матрица задач компьютерного моделирования

№ задачи п/п	Время профилирования, с	Угловая скорость вращения бойков, рад/с	Калибровка бойков
1	0,1	2,500	Калибровка 1
2	1	0,250	
3	2	0,125	
4	0,1	2,500	Калибровка 2
5	1	0,250	
6	2	0,125	
7	0,1	2,500	Калибровка 3
8	1	0,250	
9	2	0,125	
10	0,1	2,500	Калибровка 4
11	1	0,250	
12	2	0,125	

На рис. 3.34 представлена калибровка бойка 1. Следует также отметить, что верхняя часть бойка при математическом моделировании не участвует в процессе деформации, поэтому ее приняли произвольной формы.

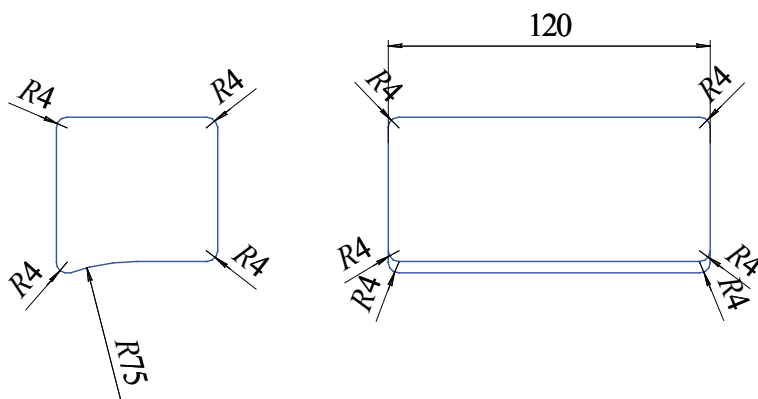


Рис. 3.34. Калибровка бойка 1

Твердотельные модели заготовки, бойков и привода вращения были созданы в графической программе Компас-3D, сохранены в файлы с расширением «*stl*» и перенесены в среду Deform для постановки задачи. На рис. 3.35 и 3.36 представлены соответственно твердотельные модели заготовки и устройства для моделирования процесса профилирования заднего конца в среде Deform-3D.

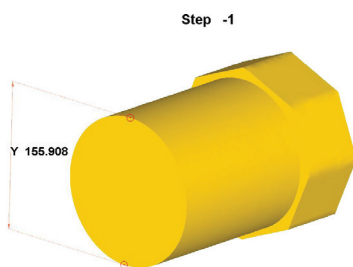


Рис. 3.35. Модель заготовки в среде Deform-3D

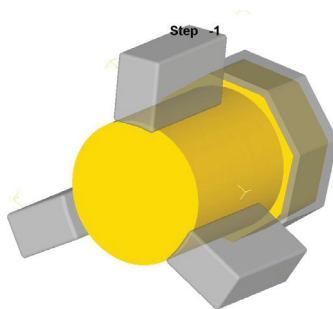


Рис. 3.36. Твердотельная модель устройства для моделирования процесса профилирования заднего конца заготовки

Для уменьшения времени расчета в очаге деформации было создано цилиндрическое окно плотности (см. рис. 3.37), в котором размер элементов заготовки составил 3 мм, а вне окна — 12 мм. Степень деформации элемента, при достижении которой происходит автоматическое обновление сетки, была принята равной  $\varepsilon = 0,15$ .

В качестве материала заготовки использовалась сталь AISI-1045, являющаяся аналогом российской стали марки Д. Температура заготовки была принята равной 1200 °С. Температуры бойков и привода вращения принимались равными 150 °С. Частота вращения привода заготовки задавалась равной 300 об/мин, как при физическом моделировании процесса профилирования заднего конца заготовки (п. 3.3).

Условия трения задавались по закону Зибеля. Показатель трения между бойками и заготовкой был принят равным  $\psi = 0,3$ , а между заготовкой и приводом вращения —  $\psi = 1$ .

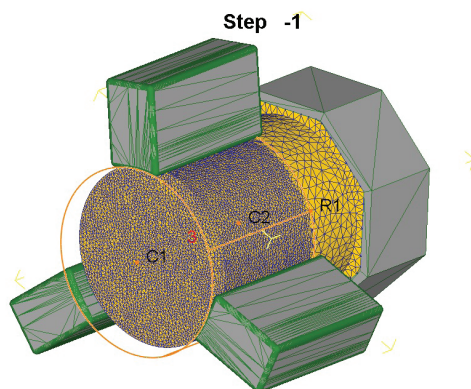


Рис. 3.37. Окно плотности в очаге деформации

Таблица 3.11

Результаты измерения глубины утяжины на конце заготовки

№ задачи п/п	Средняя глубина утяжины, мм	Номер калибровки бойков
1	13,31	Калибровка 1
2	17,29	
3	23,47	
4	21,01	Калибровка 2
5	25,16	
6	27,13	
7	8,4	Калибровка 3
8	0	
9	11,01	
10	7,84	Калибровка 4
11	8,25	
12	9,97	

По данным табл. 3.11 были построены графики, характеризующие зависимость глубины утяжины от времени профилирования и типа калибровки (см. рис. 3.38).

Из графиков, изображенных на рис. 3.38, видно, что с увеличением времени профилирования от 0,1 до 2 с происходит увеличение глуби-

ны утяжины на заднем конце заготовки. Однако при большой скорости профилирования (время профилирования 0,1 с) происходит отслоение металла с поверхности заготовки. Поэтому можно сделать вывод о том, что процесс профилирования необходимо проводить за время 1–2 с.

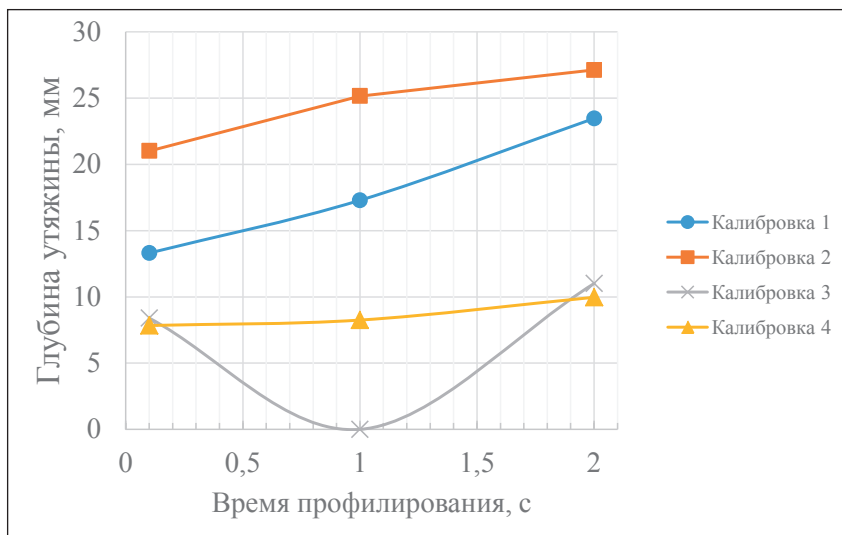


Рис. 3.38. Графики, характеризующие зависимость глубины утяжины от времени профилирования и типа калибровки

Также из рис. 3.38 видно, что наименьшее значение глубины утяжины на заднем торце заготовки достигается при использовании калибровки бойков с гребнем № 3 (см. рис. 3.39). При использовании калибровки 3 и времени профилирования 1 с (задача № 8) удалось избежать образования утяжины и сформировать на конце заготовки усеченный конус формой и размерами (см. рис. 3.10, з), обеспечивающими минимизацию глубины утяжины, образующейся в процессе прокатки в трехвалковом обжимном стане винтовой прокатки.

Таким образом, в ходе конечно-элементного моделирования были опробованы различные варианты калибровок бойков, а также режимы профилирования заднего конца заготовок. Было установлено, что калибровка бойков 3 (см. рис. 3.39) обеспечивает в процессе профилирования формирование на заднем конце заготовки конуса с формой и размерами близкими к требуемым (см. рис. 3.10, з). При этом скорость вращения бойков должна составлять 0,25 рад/с, а время профилирования — 1 с.

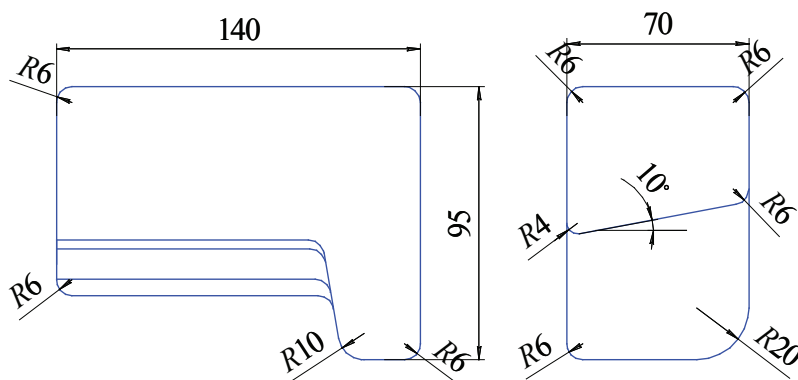


Рис. 3.39. Калибровка бойка 3

### 3.4.2. Влияние температурных полей на формоизменение концевой части заготовки

Исследование влияния температурных полей на формоизменение конца заготовки в процессе профилирования проводилось с помощью программного комплекса Deform и было установлено, что охлаждение заготовки на воздухе в течение 30–60 с приводит к уменьшению глубины утяжины на 7 %. Принудительное охлаждение конца заготовки в спреерном устройстве позволяет повысить эффективность процесса профилирования и уменьшить глубину утяжины. Для оценки влияния температурных полей на формоизменение конца заготовки при профилировании было произведено моделирование процесса формоизменения заготовки с наружным охлажденным слоем.

При постановке задачи все исходные параметры: материал заготовки, коэффициенты трения, температура инструмента, количество конечных элементов, частота вращения заготовки, калибровка бойков — были заданы такими же, как и в задаче № 2 (п. 3.4). Температура центральной части заготовки была принята равной 1200 °С, а температура наружного слоя — 1100 °С. На рис. 3.40 представлена модель заготовки с охлажденным наружным слоем, а на рис. 3.41 — заготовка и ее продольный разрез после профилирования.

Средняя глубина утяжины на конце заготовки после профилирования составила 10,8 мм, а в задаче № 2 (см. табл. 3.11) — 17,29 мм.

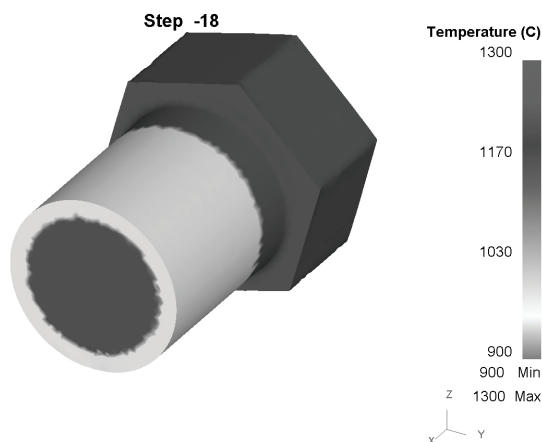


Рис. 3.40. Модель заготовки с охлажденным наружным слоем

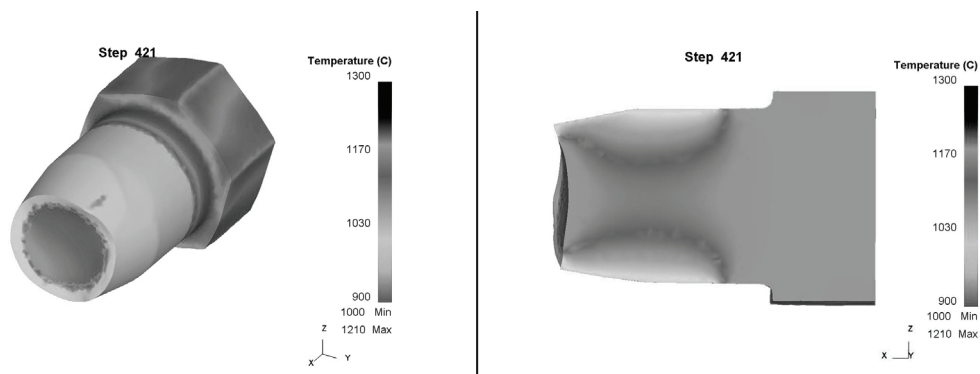


Рис. 3.41. Заготовка и ее продольный разрез после профилирования

На рис. 3.42 представлена диаграмма, характеризующая глубину утяжины после профилирования заготовки без охлажденного наружного слоя — *а* и с охлажденным наружным слоем — *б*.

Из рис. 3.42 видно, что охлаждение наружного слоя заготовки позволяет уменьшить глубину утяжины на 37,5 %. В связи с этим при выполнении рабочего проекта реконструкции входной стороны трехвалкового обжимного стана предусмотрена установка спреера.

В результате комплексных исследований процесса образования утяжины на конце заготовки при прокатке в трехвалковом обжимном стане и в процессе профилирования ее конца, выполненных с целью минимизации размеров утяжин и уменьшения количества поверхностных дефектов на готовых трубах, сделаны следующие выводы:

- придание специальной формы концам заготовки перед прокаткой в трехвалковом обжимном стане позволяет уменьшить глубину утяжин на 72 %, а также максимально снизить риск отрыва кольцевого отслоения на заднем конце гильзы при прошивке. Наименьшая глубина утяжины обеспечивается при формировании на заднем конце заготовки конуса, представленного на рис. 3.10, *г*;
- с увеличением скорости профилирования заднего конца заготовки глубина утяжины уменьшается, однако при высокой скорости деформации (деформация за 0,1 с) происходит отслоение металла с поверхности заготовки; были установлены калибровка бойков и режимы деформации, обеспечивающие формирование в процессе профилирования на заднем конце заготовки усеченного конуса требуемой формы;
- охлаждение поверхностных слоев металла заготовки в линии ТПА-80 перед профилированием заднего конца является эффективным с точки зрения уменьшения размеров утяжин.

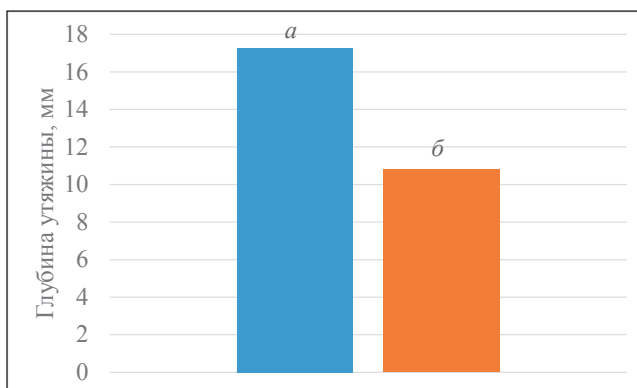


Рис. 3.42. Диаграмма, характеризующая глубину утяжины после профилирования заготовки без охлажденного наружного слоя — *a* и с охлажденным наружным слоем — *б*

## 4. Оборудование и настройка станов винтовой прокатки

---

### 4.1. Оборудование и настройка трехвалкового стана винтовой прокатки

---

#### 4.1.1. Назначение и область применения

**Т**рехвалковые станы винтовой прокатки предназначены для прокатки изделий круглого сечения из сталей и сплавов. Они применяются в составе трубопрокатных агрегатов для прокатки сплошных круглых заготовок (обжимной стан), для раскатки труб (стан Ассела), а также для обкатки труб (обкатной стан).

Ниже представлено описание состава оборудования трехвалкового стана винтовой прокатки на примере обжимного стана.

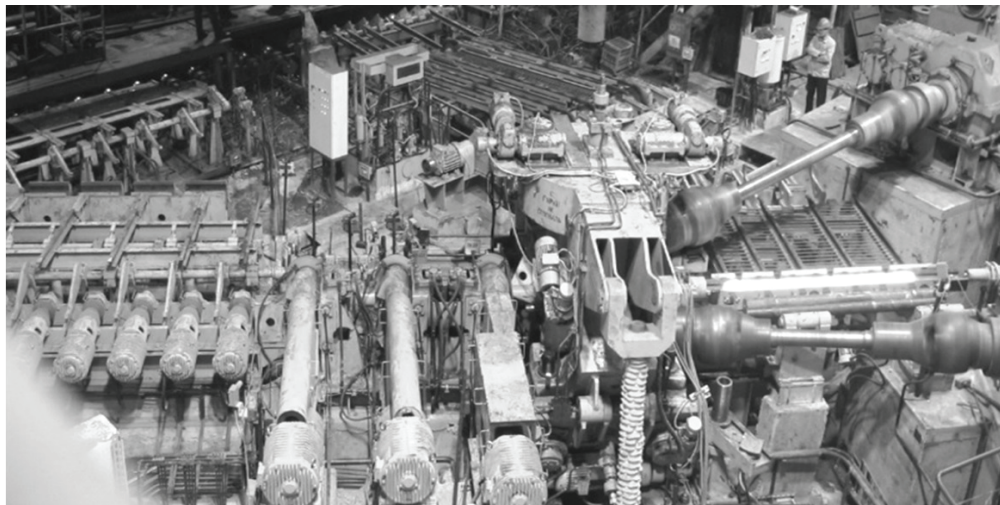


Рис. 4.1. Участок обжимного стана



Обжимной стан предназначен для деформации непрерывно-литой заготовки с целью повышения качества структуры и технологических свойств стали перед прошивкой. Заготовка диаметром 150 (156) мм обжимается до необходимого размера  $\varnothing 120$  мм. Внешний вид участка обжимного стана приведен на рис. 4.1. Обжимной стан имеет в своем составе трехвалковую клеть винтовой прокатки с чашевидными валками. Вид рабочей клетки представлен на рис. 4.2.

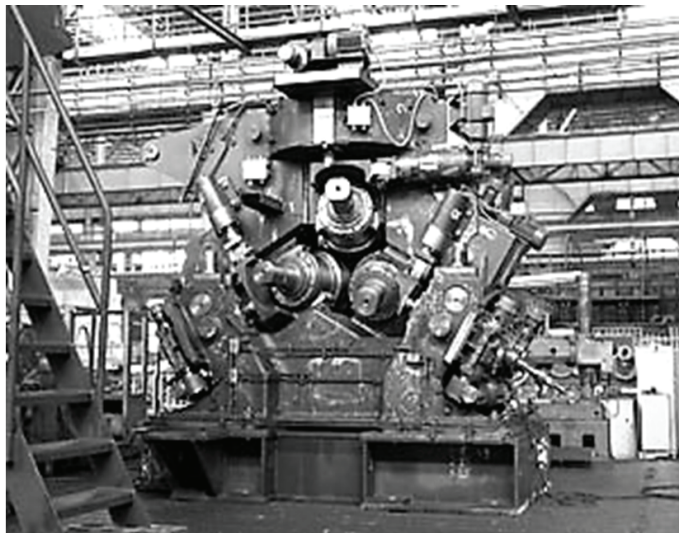


Рис. 4.2. Рабочая клеть обжимного стана

#### 4.1.2. Описание оборудования участка обжимного стана

Обжимной стан имеет механические, гидравлические, пневматические и электрические системы. Расположение оборудования на участке обжимного стана на ПАО «СинТЗ» показано на рис. 4.3.

В состав оборудования обжимного стана входят:

- система жидкой и густой смазки;
- гидросистема;
- система автоматического управления работой всех механизмов стана.

*Участок перед обжимным станом.* Предназначен для передачи заготовки с рольганга линии горячей резки в желоб входной стороны обжимного стана. Участок перед обжимным станом состоит из следую-

щих узлов: упор опускающийся; выбрасыватель; цепной транспортер; стол поворотный; выбрасыватель; решетка наклонная с дозатором.

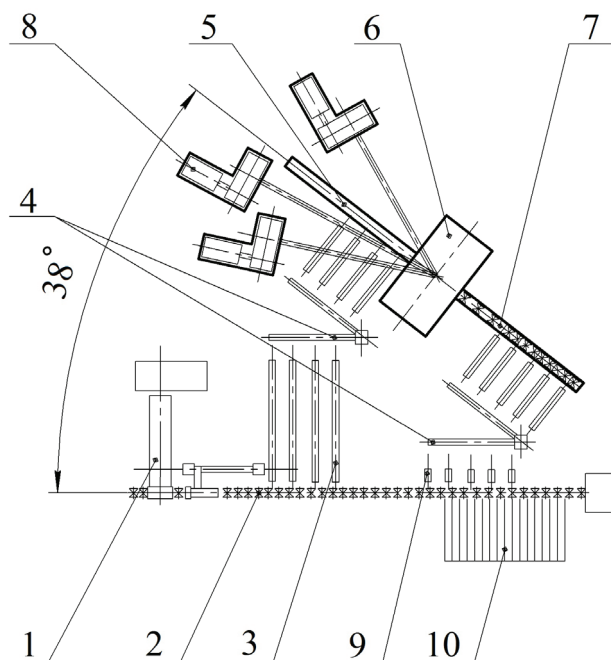


Рис. 4.3. Схема расположения оборудования на участке обжимного стана:

- 1 — ножницы горячей резки; 2 — рольганг; 3 — цепной транспортер; 4 — поворотный стол;  
5 — стол передний; 6 — рабочая клеть; 7 — выходная сторона; 8 — электродвигатели;  
9 — задержник; 10 — наклонная решетка прошивного стана

*Стол передний*, расположенный перед клетью обжимного стана, предназначен для приема и передачи заготовки к валкам на уровень, соответствующий оси прокатки. Стол состоит из желоба, в который передается заготовка, и механизма настройки стола по высоте. Установка стола по высоте регулируется с помощью набора прокладок. В процессе работы агрегата стол прижат к прокладкам за счет включения гидроцилиндра на опускание стола. Для подачи заготовки в рабочую клеть используется вталкиватель.

*Рабочая клеть с механизмом откидывания крыши.* Рабочая клеть, представленная на рис. 4.4, состоит из станины, состоящей в свою очередь из основания 1 и крыши 2, трех барабанов с рабочими валками 3; трех механизмов поворота барабана 4; трех механизмов перемещения барабана с валком 5; рамы 6 и механизма откидывания крыши 7.

*Станина* предназначена для крепления всех узлов и механизмов рабочей клетки. Включает в себя основание 1 (рис. 4.4) и крышу 2, скрепленные между собой шарнирно осью 8 и клиновыми соединениями 9. Крыша имеет возможность при перевалке откидываться на  $180^\circ$ . В расточках станины установлены бронзовые планки для облегчения перемещения и поворота барабанов с рабочими валками при настройке раствора валков и угла подачи.

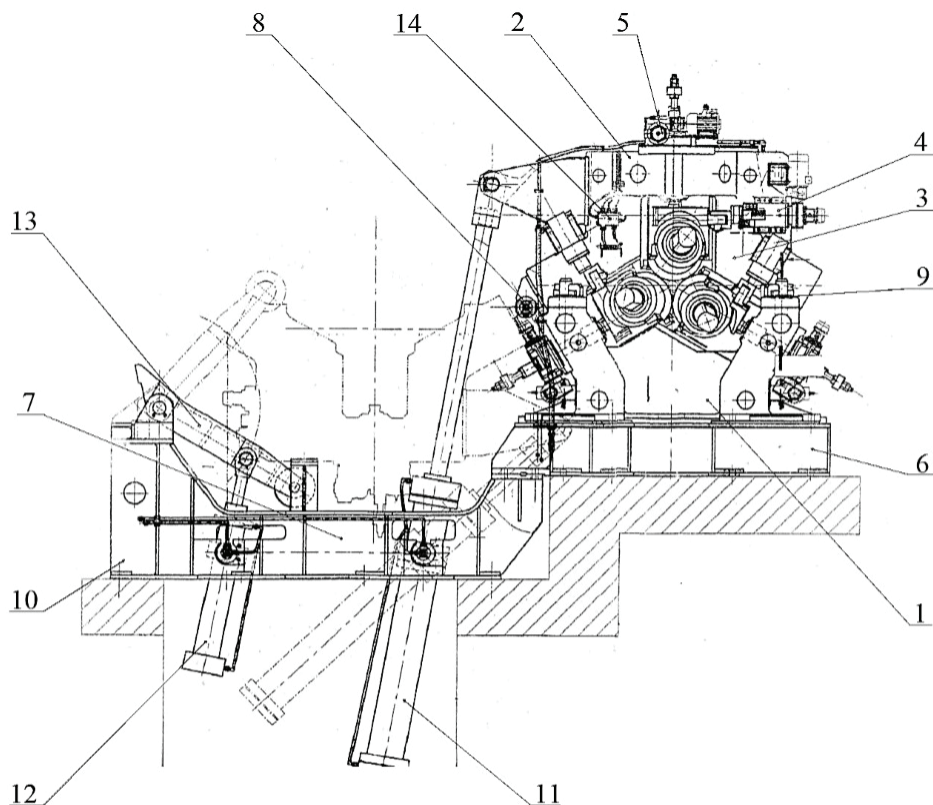


Рис. 4.4. Клеть рабочая с механизмом откидывания крыши

*Барабан с рабочим валком* служит для передачи момента прокатки от привода на заготовку, а также для восприятия усилия прокатки, возникающего при деформации, и передачи его на станину клетки.

Барабан состоит из кассеты 1 (см. рис. 4.5), в расточках которой устанавливается рабочий валок 2.

Подушки 3 рабочего валка фиксируются в расточках с помощью выступов и предохраняются от разворота за счет шпонок 4.

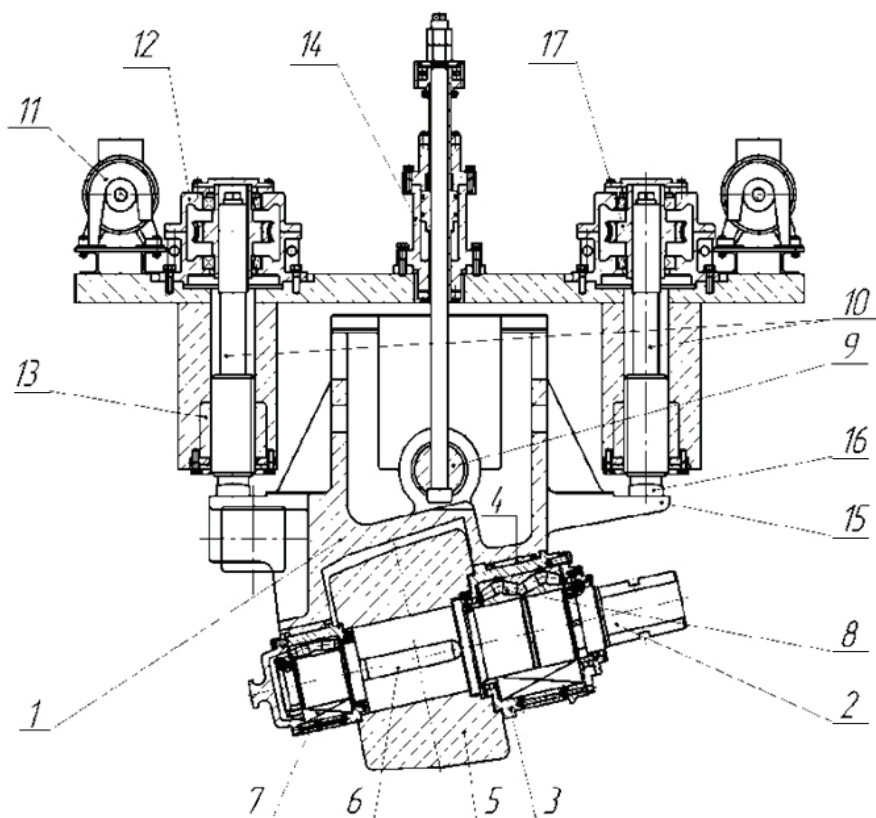


Рис. 4.5. Барабан с валком

Бочка рабочего валка 5 установлена на валу 2, а момент прокатки передается через шпонку 6.

Радиальный двухрядный сферический роликоподшипник 7 воспринимает радиальное усилие, а четырехрядный роликоподшипник с коническими роликами 8 — радиальное и осевое усилия.

Кассета закреплена в корпусе кассеты 1 на оси 9 и имеет возможность проворачиваться относительно них при настройке угла раскатки.

*Механизм перемещения барабана с валком.* Механизм предназначен для перемещения барабана с валком при изменении величины раствора калибра, восприятия усилия прокатки и передаче его на станину, а также для точной настройки угла раскатки.

Механизм включает два нажимных винта 10 (рис. 4.5) с индивидуальными приводами, состоящими из электродвигателя 11 и редуктора 12, гайки упорной 13, установленной в расточках основания

и крыши станины, и гидроцилиндра 14, служащего для обеспечения прижатия кассеты через сферические опоры к нажимным винтам и для выборки зазоров в соединении нажимного винта с гайкой.

Нажимные винты упираются в специальные опорные поверхности 15 кассеты. Для обеспечения плотного прилегания торцевой поверхности винта к плоскости опор кассеты торец винта выполнен сферическим с внутренней сферой, а между кассетой и нажимным винтом установлена сферическая пята 16, закрепленная на винте.

Гидроцилиндр 14, служащий для выбора зазоров в соединении винт — гайка и между винтом и подушкой, установлен на оси барабана и закреплен на станине. На штоке гидроцилиндра имеется молотковая головка, которая заводится в паз на оси 9 и поворачивается на 90°.

Крайнее положение барабана с валком контролируется конечными выключателями, а для настройки раствора валков используются импульсные датчики, установленные на промежуточном валу редуктора 17.

Механизм поворота барабана 4 (см. рис. 4.5) служит для изменения угла подачи рабочих валков во время настройки стана, а также для предохранения от поворота барабана с валком вокруг своей оси во время прокатки.

Механизм размещен на станине клетки и представляет из себя регулируемый винтовой упор, состоящий из корпуса, поступательно перемещающейся бронзовой гайки, которая приводится в движение посредством винта. Вращение на винт передается от электродвигателя через червячный редуктор. Крайнее положение поворота барабанов контролируется конечными выключателями, закрепленными на корпусе. Для настройки угла подачи используются импульсные датчики на выходном валу редуктора

*Механизм откидывания крыши* предназначен для откидывания крыши при замене валков и состоит из рамы 10 (см. рис. 4.4), жестко скрепленной с рамой 6 рабочей клетки, гидроцилиндра опрокидывания крыши 11, поддерживающего гидроцилиндра 12 и рычага с роликом 13.

Гидросистема обжимного стана состоит из насосной станции, панели с гидроаппаратурой, блока пневмогидроаккумулятора, гидроцилиндров и трубопроводов.

*Разводка трубопроводов пластичной смазки и охлаждения по клетям.* Система смазки и охлаждения 14 (см. рис. 4.4) предназначена для смазки и отвода тепла от трущихся поверхностей. Предусмотрена одна си-

стема жидкой смазки, которая расположена в маслоподвале, и две системы густой смазки, расположенные на поверхности пола цеха.

*Выходной стол обжимного стана* — это комплекс механизмов, обеспечивающих центрирование заготовки, выходящей из клетки обжимного стана. Выходной стол состоит из приемно-передающего устройства, рольганга, выбрасывателя, упора стационарного.

Приемно-передающее устройство содержит три пары выдающих роликов и проводки. Каждый из роликов имеет индивидуальный привод от электродвигателей через карданные валы. Сведение и разведение роликов осуществляется посредством работы пневмоцилиндров.

Рольганг состоит из шести водоохлаждаемых роликов с индивидуальным приводом. Упор стационарный служит для ограничения хода заготовки по рольгангу. Выбрасыватель осуществляет передачу заготовки с роликов рольганга на решетку поворотного стола.

Оборудование участка за обжимным станом предназначено для задачи заготовок с выходной стороны обжимного стана на входную сторону прошивного стана и состоит из следующих основных узлов:

- стол поворотный;
- задержник;
- выбрасыватель;
- карманы с перекрывателем;
- решетка.

#### 4.1.3. Описание работы обжимного стана

Заготовка по роликам рольганга поступает со стороны линии горячей резки до опускающегося упора и останавливается. Затем заготовка с роликов рольганга рычагами выбрасывателя снимается на наклонную решетку и по наклонно установленным балкам скатывается на направляющие транспортера, установленного за наклонной решеткой. По направляющим транспортера с помощью захватов, смонтированных на цепях, заготовка передается на направляющие кармана с перекрывателем и по ним скатывается в желоб поворотного стола. Если заготовка имеет брак, то направляющие перекрывателя поднимаются, открывают карманы, и заготовка падает в них, после чего направляющие перекрывателя опускаются в исходное положение и перекрыва-



ют карманы. С позиции приема заготовки стол поворачивается на  $38^\circ$  и становится на позицию выдачи заготовки. Затем заготовка из желоба поворотного стола рычагами выбрасывателя выдается на направляющие наклонной решетки и по ним скатывается в желоб переднего стола обжимного стана.

Заготовка в клеть обжимного стана подается вталкивателем. Далее с роликов рольганга выходной стороны обжимного стана заготовка выбрасывается на решетку и останавливается задержником, после чего скатывается в желоб поворотного стола. Стол с заготовкой поворачивается на  $38^\circ$  и останавливается параллельно задающему рольгангу переднего стола прошивного стана. Рычаги выбрасывателя за поворотным столом находятся в крайнем нижнем положении и заходят в пазы желоба стола при его повороте, затем поднимаются, и заготовка скатывается по решетке на приемный рольганг прошивного стана.

Прокатка заготовки осуществляется при температуре не менее  $1170^\circ\text{C}$ , при частоте вращения валков от 90 до 120 об/мин. При ухудшении состояния поверхности валков частота вращения валков снижается до 75–90 об/мин. Оптимальный угол подачи —  $14\text{--}16^\circ$ . Угол раскатки равен  $12^\circ$ . Калибровка валков обжимного стана универсальна для всех применяемых диаметров заготовок и представлена на рис. 4.6.

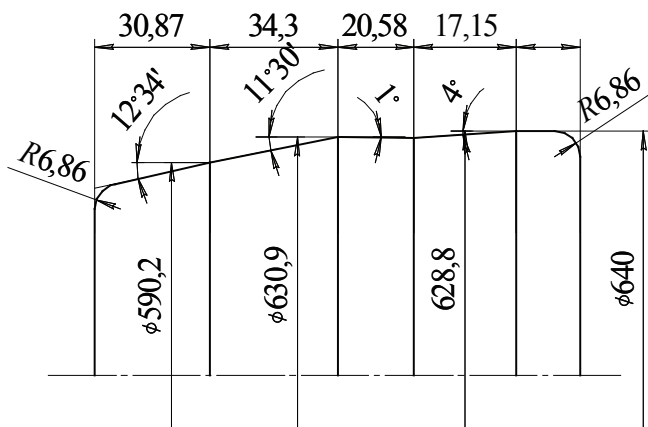


Рис. 4.6. Калибровка валков обжимного стана

#### 4.1.4. Настройка обжимного стана и его эксплуатация

Настройка обжимного стана заключается в следующем. Необходимо отрегулировать углы подачи и раскатки, подачу охлаждающей воды на выдающие ролики, направить водяные патрубки точно на ручки роликов. В зависимости от состояния валков установить скоростной режим прокатки.

Настройка валков осуществляется следующим образом:

- вместо вводной и выводной проводок устанавливается специальное устройство для выставления валков на ось прокатки стана;
- валки поочередно сводятся до соприкосновения с калиброванным шаблоном устройства.

Для корректировки оси прокатки при задаче заготовки используется подъем (опускание) переднего стола.

При возникновении заполировки валков необходимо проверить температуру и равномерность нагрева прокатываемых заготовок, установить минимальную частоту вращения валков 30–60 об/мин, снизить угол подачи до 12°.

Настройка стана считается правильной, если захват металла валками происходит плавно, без ударов, отсутствует перегрузка двигателей, размеры заготовки после обжатия (диаметр 120 мм; длина — с учетом коэффициента вытяжки) соответствуют таблице прокатки или заданию на прокат, на поверхности заготовки отсутствуют дефекты прокатного происхождения, приводящие к браку или снижению сортности.

При появлении винтового рельефного следа на прокатанной заготовке или ухудшении захвата необходимо провести перевалку валков.

Ориентировочный объем проката до перекалибровки (снятия валков для их восстановления) составляет:

- для ненаплавленных валков: 10–15 тыс. т;
- для наплавленных валков: 10–20 тыс. т.

Перевалка на обжимном стане производится при выработке рабочей поверхности на калибрующем участке валка более 2,5 мм. Перевалка валков осуществляется барабанами в сборе с рабочими валками согласно руководству по эксплуатации.

При перевалке необходимо выполнить следующие работы:

- отключить главный привод;
- сбросить давление с плунжерных гидроцилиндров и развернуть барабаны с рабочими валками на минимальный угол подачи 10°;



- отвести барабаны от оси прокатки в крайнее положение;
- отсоединить шпиндели главного привода от рабочих валков;
- отсоединить шланги подачи централизованной густой смазки и охлаждающей воды;
- отсоединить два нижних барабана с рабочими валками от механизмов перемещения барабанов;
- снять клинья и шайбы, служащие для крепления крышки станины к основанию;
- рычаг с опорным роликом с помощью гидроцилиндра поднять в крайнее верхнее положение;
- гидроцилиндром повернуть крышку клетки на угол  $130^\circ$  до соприкосновения с роликом и сбросить в гидроцилиндре давление;
- отсоединить верхний барабан с рабочим валком от механизма перемещения барабана, выполнив те же операции, что и для нижних барабанов;
- гидроцилиндром опустить ролик в нижнее положение, повернув крышку до  $180^\circ$ , и опереть ее на раму;
- произвести замену барабанов с рабочими валками на новые;
- произвести вышеуказанные действия в обратном порядке и подготовить клеть к работе.

## **4.2. Реконструкция оборудования входной стороны трехвалкового обжимного стана на основе результатов компьютерного моделирования и промышленных экспериментов**

---

Для внедрения нового способа обжатия заготовки потребуются реконструкция переднего стола трехвалкового обжимного стана ТПА-80: реконструкция вталкивателя, желоба и входной проводки.

### **4.2.1. Участок входной стороны трехвалкового обжимного стана**

Схема расположения оборудования, участка входной стороны стана представлена на рис. 4.7. В состав оборудования участка входят: выбрасыватели заготовки с рольганга от ножниц и с поворотного сто-

ла 1; транспортер с цепными шлепперами 2 и наклонные решетки 3; карман с перекрывателем 4; поворотный стол 5; вталкиватель заготовки с пневмоцилиндром 6; секции желоба переднего стола трехвалкового стана 7 и входная проводка 8. Заготовка после ножниц горячей резки перемещается по рольгангу до упора и рычажным выбрасывателем подается на наклонную решетку, а затем на транспортер с цепными шлепперами.

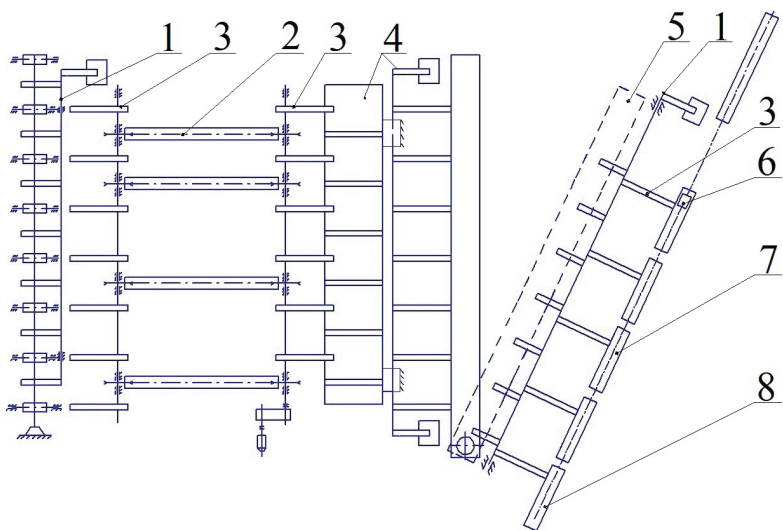


Рис. 4.7. Участок входной стороны трехвалкового обжимного стана

За транспортером установлен карман с перекрывателем для приема охлажденной заготовки в аварийной ситуации. В рабочем режиме заготовки от транспортера по наклонной решетке скатываются на поворотный стол, а затем рычажным выбрасывателем поштучно подаются на наклонную решетку и попадают на передний стол трехвалкового обжимного стана. Передний стол состоит из четырех секций желоба, три из них длиной 750 мм, четвертая перед входной проводкой 820 мм, т.е. общая длина желоба 3070 мм. Отметим, что максимальная длина заготовки составляет 2500 мм. Расстояние между четвертой секцией и входной проводкой 150 мм, а длина входной проводки — 1000 мм. Длина пневмоцилиндра и вталкивателя в крайнем заднем положении составляет 4920 мм, а положение вталкивателя от торца первого желоба определяется расстоянием 170 мм. Таким образом, ход толкателя до подачи заготовки во входную проводку составляет 2080 мм. Рассто-

яние от торца входной проводки до входа в очаг деформации, образуемой тремя валками, составляет 200–250 мм, а длина очага деформации ~ 200 мм.

#### **4.2.2. Техническое задание на реконструкцию входной стороны обжимного стана ТПА-80**

Реконструкция входной стороны обжимного стана ТПА-80 выполняется для совмещения процесса обжатия непрерывно-литой заготовки диаметром 150 мм или 156 мм до диаметра 120–123 мм с операцией профилирования заднего конца заготовки в виде усеченного конуса. Ранее было показано, что профилирование конца заготовки обеспечивает рациональное формоизменение его на прошивном стане, предотвращает образование и отрыв кольцевого отслоения, являющегося причиной образования вмятин на наружной поверхности труб. Математическое моделирование формоизменения металла на заднем конце заготовки, а также промышленные эксперименты показали, что количество несоответствий по вмятинам можно уменьшить и повысить сдачу труб с первого предъявления по назначению.

Поставлена задача: обеспечить формирование заднего конца заготовки в виде усеченного конуса путем совмещения основного процесса прокатки и процесса профилирования заднего конца заготовки инструментом деформации.

Для решения поставленной задачи подготовлено техническое задание:

- разработать способ формирования заднего конца заготовки в виде усеченного конуса на заключительной стадии процесса прокатки в обжимном стане;
- обжатие заготовки диаметром 156 мм или 150 мм осуществляется до диаметра 120–123 мм в зависимости от длины заготовки;
- длина заготовки: max — 2500 мм, min — 1100 мм согласно технической характеристике стана;
- температура заготовки перед обжимным станом составляет 1200–1250 °С в зависимости от марки стали.

При выполнении конструкторской проработки необходимо:

- обеспечить беспрепятственный прием заготовки в реконструируемый желоб входного стола;

- обеспечить подачу заготовки в валки трехвалкового стана с центрированием заднего конца по оси прокатки для предотвращения биения заготовки;
- обеспечить формирование заднего конца заготовки в виде усеченного конуса независимо от исходной длины заготовки;
- разработать конструкцию механизма регулирования положения инструмента в радиальном направлении и установку механизма во входной проводке;
- обеспечить регулирование положения специального инструмента в радиальном направлении в диапазоне от 0 до 20 мм;
- отработать режим обжатия конца заготовки, при котором выполняется условие захвата и обеспечивается стабильный процесс прокатки;
- обеспечить радиальную настройку инструмента деформации во время перемещения заготовки на 350—450 мм после захвата ее валками трехвалкового стана винтовой прокатки;
- разработать конструкцию вталкивателя заготовки, снабженного специальным инструментом деформации, с возможностью его радиального перемещения;
- конструкция вталкивателя должна обеспечить формирование на конце заготовки усеченного конуса длиной 70 мм без утяжины;
- конструкция вталкивателя должна обеспечивать разведение специального инструмента в радиальном направлении в начальный момент перемещения заготовки к рабочей клетки обжимного стана;
- обеспечить охлаждение специального инструмента во время профилирования заднего конца в виде усеченного конуса с выпуклым торцом;
- предусмотреть охлаждение заднего конца заготовки с установкой спреера на механизме радиальной настройки инструмента, обеспечивающего равномерное по периметру охлаждение поверхностного слоя конца заготовки толщиной 3—5 мм на 100—150 °С по сравнению с исходной температурой 1200—1250 °С;
- конструкция желоба должна обеспечивать прием и укладку заготовки по оси прокатки без перекоса;
- конструкция желоба не должна приводить к принудительной остановке вталкивателя при подаче заготовки в обжимной стан и при отводе его в исходное положение;

- предлагаемая конструкция не должна приводить к увеличению времени цикла прокатки на обжимном стане, достигнутом в настоящее время;
- предлагаемый способ прокатки литой заготовки на обжимном стане не должен приводить к образованию частиц металла;
- рассмотреть возможность использования пневмоцилиндра вталивателя, секций желоба приемного стола, входной проводки и механизма настройки стола по высоте без реконструкции, либо с минимальным объемом работы при реконструкции.

#### 4.2.3. Компоновка основных узлов входного стола обжимного стана по предлагаемому варианту реконструкции

Схема расположения оборудования на входном столе обжимного стана после реконструкции представлена на рис. 4.8.

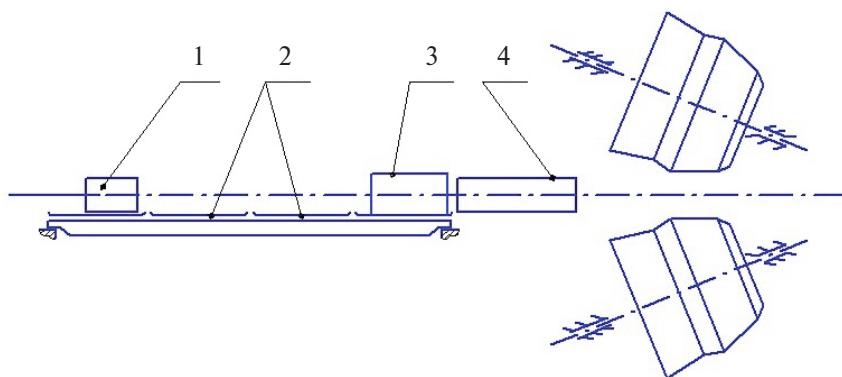


Рис. 4.8. Схема расположения оборудования на переднем столе обжимного стана:  
1 — вталиватель; 2 — секции желоба; 3 — входная проводка; 4 — валки

В состав оборудования обжимного стана входят: вталиватель заготовки 1, в котором шарнирно закрепляется инструмент деформации (бойки); четыре секции желоба 2; механизм радиальной настройки инструмента деформации для профилирования заднего конца заготовки устанавливается во входной проводке 3. Установка новых механизмов вталивателя заготовки и радиальной настройки инструмента деформации осуществляется без изменения существующей компоновки основных узлов переднего стола обжимного стана.

#### 4.2.4. Кинематический расчет процесса профилирования заднего конца заготовки

Длина непрерывно-литой заготовки, применяемой на ТПА-80 ПАО «СинТЗ», составляет 1100–2500 мм.

Продолжительность операций с заготовкой на обжимном стане определена по усредненным данным хронометража десяти заготовок длиной 2050 мм:

- такт прокатки от начала обжатия одной до начала обжатия следующей заготовки — 13,50 с;
- скат заготовки по наклонной решетке в желоб поворотного стола — 2,19 с;
- поворот стола с заготовкой на угол  $38^\circ$  — 2,85 с;
- переключивание заготовки выбрасывателем на наклонную решетку — 2,53 с;
- скат заготовки по наклонной решетке в желоб входного стола обжимного стана — 1,83 с;
- движение вталкивателя до заготовки — 1,03 с;
- подача заготовки по желобу вталкивателем в валки обжимного стана — 1,70 с;
- обжатие заготовки до диаметра 120 (121,5) мм — 6,73 с;
- профилирование заднего конца заготовки в виде усеченного конуса с выпуклым торцом — 1,98 с;
- движение заготовки до упора — 2,71 с;
- переключивание заготовки выбрасывателем на наклонную решетку — 1,23 с;
- скат заготовки по наклонной решетке в желоб поворотного стола — 3,24 с.

Время цикла прокатки определяется с помощью циклограммы. После реконструкции входной стороны обжимного стана технологическая операция «профилирование заднего конца заготовки в виде усеченного конуса» осуществляется после захвата заготовки валками, а время профилирования, как показано на циклограмме, находится в перекрытии времени обжатия заготовки до диаметра 120 (121,5) мм. Выполним расчет времени профилирования: диаметр валка в сечении первичного захвата равен  $D_b = 630$  мм, число оборотов валка после полного захвата заготовки равно  $n_b = 75$  об/мин, диаметр заготовки равен  $d_3 = 156$  мм, число оборотов заготовки можно определить из ус-

ловия равенства окружных составляющих скорости валка и заготовки:  $n_{\text{заг}} = \frac{D_{\text{в}} \cdot n_{\text{в}}}{d_3} = \frac{630 \cdot 75}{156} = 303 \text{ об/мин} = 5,05 \text{ об/с}$ .

Осевое перемещение заготовки за один оборот или шаг винтовой линии на входной стороне стана равен  $S = \frac{l_{\text{заг}}}{n_{\text{заг}} \cdot t}$ , где  $l_{\text{заг}} = 2050 \text{ мм}$  — длина заготовки до обжатия;  $n_{\text{заг}} = 5,05 \text{ об/с}$  — число оборотов заготовки, с;  $t = 6,73 \text{ с}$  — время прокатки заготовки в обжимном стане. Тогда шаг винтовой линии на входной стороне стана равен  $S = 60 \text{ мм/об}$ . Время прокатки заготовки длиной  $l = 2050 \text{ мм}$  составляет  $6,73 \text{ с}$ , а время формовки заднего конца заготовки —  $1\text{--}2 \text{ с}$ . Таким образом, длина рабочей части копира нажимного устройства должна быть не менее  $600 \text{ мм}$ , а в процессе профилирования конца заготовки совершать  $\approx 5\text{--}10 \text{ об}$  — этого вполне достаточно для формирования на заднем конце заготовки усеченного конуса.

Конструкция крепления вталкивателя со штоком пневмоцилиндра остается без изменения. Профилирующее устройство срабатывает вне зависимости от длины заготовки в момент, когда вталкиватель входит во входную проводку обжимного стана и срабатывает только после захвата заготовки валками. По мере продвижения профилирующего устройства вталкивателя во входной проводке на участке длиной  $80 \text{ мм}$  достигается соосность заднего конца заготовки и оси входной проводки. В дальнейшем с помощью трех профильных планок бойкам сообщается радиальное перемещение. Благодаря этому за  $1\text{--}2 \text{ с}$  формируется усеченный конус, а вталкиватель за это время проходит во входной проводке расстояние, равное  $600 \text{ мм}$ , а заготовка при этом совершает  $5\text{--}10$  оборотов. Минимальный диаметр усеченного конуса на заготовке равен  $120 (121,5) \text{ мм}$ .

#### 4.2.5. Реконструкция вталкивателя заготовки

Новая конструкция вталкивателя представлена на рис. 4.9. В пазах корпуса 3 вталкивателя установлены три бойка 1, которые являются инструментом деформации. Бойки имеют калибровку № 3 (см. рис. 3.39). В процессе деформации вталкиватель перемещается по направляющим желоба переднего стола и входной проводки. Особенностью предлагаемой конструкции является центрирование заднего конца заготов-

ки по оси прокатки, что обеспечивает профилирование его в виде усеченного конуса в момент контакта бойков и нажимного устройства, установленного во входной проводке.

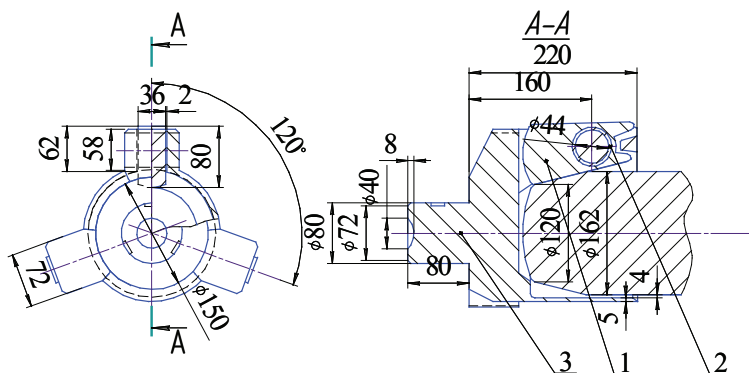


Рис. 4.9. Новая конструкция вталкивателя:

1 — боек; 2 — подшипник; 3 — корпус; 4 — заготовка

#### 4.2.6. Реконструкция желоба входной стороны обжимного стана

Новая конструкция желоба обеспечивает прием заготовки с наклонной решеткой, надежное удержание ее на желобе, беспрепятственное перемещение вталкивателя по направляющим. На рис. 4.10 показана схема желоба.

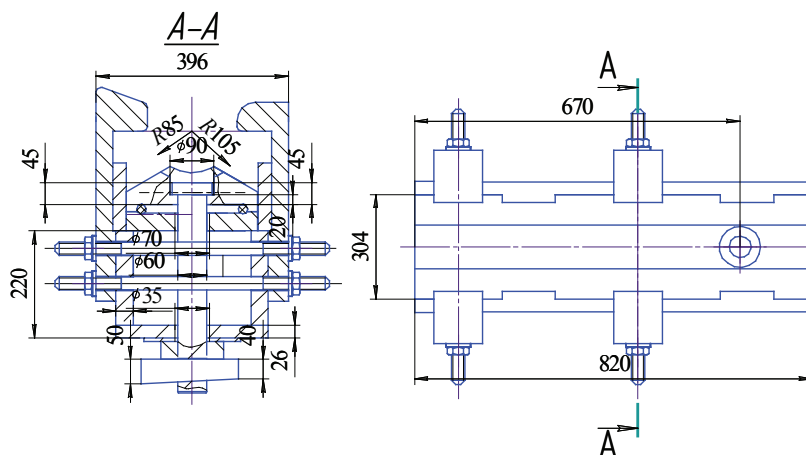


Рис. 4.10. Схема желоба



#### 4.2.7. Реконструкция входной проводки

Новая конструкция проводки (рис. 4.11) обеспечивает подачу заготовки в валки обжимного стана строго по оси прокатки, уменьшая колебательное движение конца заготовки и его профилирование бойками вталкивателя под действием нажимного устройства во входной проводке, воспринимающей крутящий момент в процессе профилирования заднего конца. Входная проводка состоит из двух частей: входной участок; участок профильных планок (нажимное устройство); цилиндрический участок для уменьшения колебательного движения конца заготовки в процессе захвата и прокатки в трехвалковом обжимном стане. В донной части пазов нажимного устройства устанавливаются профильные планки, которые имеют четыре участка: наклонные направляющие (1:20) на длине 225 мм; горизонтальные направляющие на длине 50 мм (эти участки предназначены для центрирования вталкивателя по оси прокатки и для формоизменения овального конца заготовки в цилиндр, что предотвратит возможное подтормаживание заготовки при последующем профилировании заднего конца); рабочий участок проводки длиной 320 мм обеспечивает радиальное перемещение бойков вталкивателя и профилирование заднего конца заготовки в виде усеченного конуса. На рабочем участке профильных планок средний угол наклона 1:71.

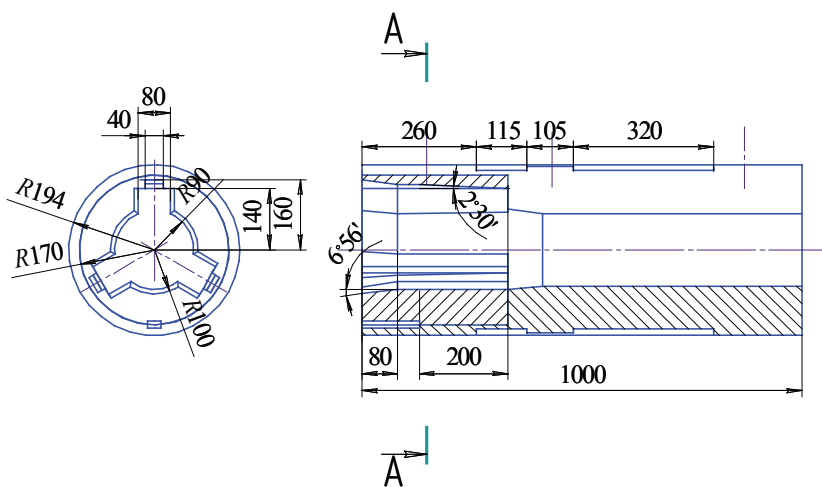


Рис. 4.11. Новая конструкция входной проводки:

1 — нажимное устройство; 2 — корпус; 3 — шпонка

В корпусе предусмотрен участок с горизонтальными направляющими длиной 355 мм и диаметром 168 мм, предназначенный для уменьшения биения заготовки в процессе прокатки. При перемещении бойков по профильным планкам нажимного устройства происходит профилирование заднего конца заготовки в виде усеченного конуса. Время профилирования составляет 1–2 с.

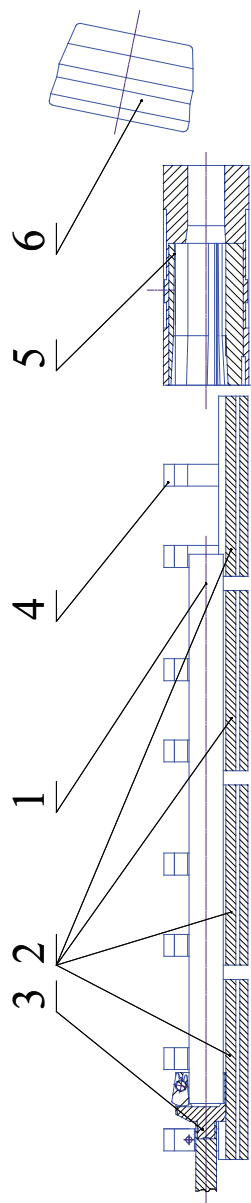
#### **4.2.8. Описание процесса прокатки заготовки в трехвалковом обжимном стане**

Процесс прокатки заготовки в трехвалковом обжимном стане осуществляется в соответствии с рис. 4.12 следующим образом. Заготовка 1 по наклонной решетке скатывается в желоб переднего стола трехвалкового обжимного стана. Для предотвращения выпадения заготовки из желоба при сбрасывании с наклонной решетки предусмотрены ограничители 4. Вталкиватель 3 перемещается по направляющим желоба переднего стола 2 и входной проводки 5 и подает заготовку 1 в валки обжимного стана 6. Различают следующие этапы: движение вталкивателя 3 до заготовки 1 (начальное положение заготовки и вталкивателя на схеме 1); подача заготовки 1 в валки 6 и обжатие переднего конца заготовки до начала сведения бойков профильными планками нажимного устройства (промежуточное положение заготовки и вталкивателя на схеме 1); профилирование заднего конца заготовки 1 и калибровка конусной части заднего конца заготовки (конечное положение заготовки и вталкивателя на схеме 1). В момент окончания процесса профилирования и калибровки заднего конца заготовки 1 вталкиватель 3 отводится в исходное положение. Представленные конструкции вталкивателя, желоба и входной проводки позволят производить профилирование и обжатие заготовки любой применяемой в цехе длины.

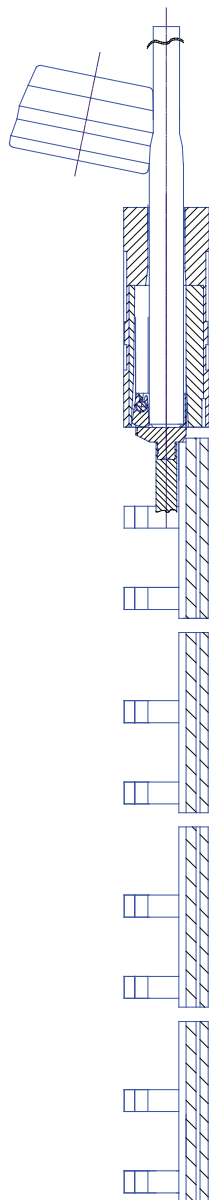
В результате проведения физического моделирования профилирования заднего конца заготовки и промышленного эксперимента, направленных на выбор оптимальной калибровки бойков, с точки зрения получения требуемой формы заднего конца заготовки после обжатия, были сделаны следующие выводы:

- при профилировании заготовки диаметром 50 мм из скульптурного пластилина бойками с контактной поверхностью с одним выпуском, выполненной по радиусу в вершине  $R = 25$  мм,

### Начальное положение заготовки и вталкивателя



### Промежуточное положение заготовки и вталкивателя



### Конечное положение заготовки и вталкивателя

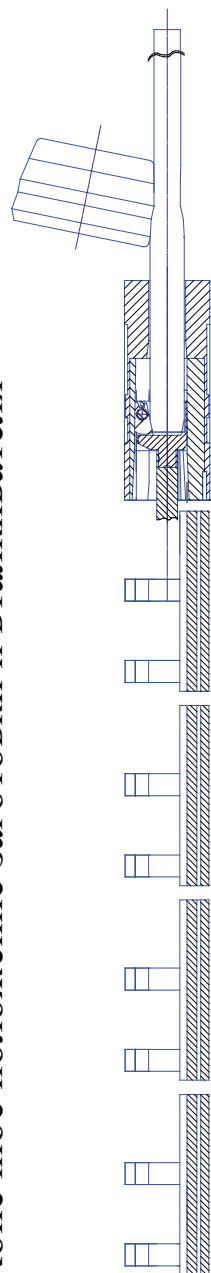


Рис. 4.12. Схема процесса прокатки заготовки в трехвалковом обжимном стане

удается на конце заготовки сформировать усеченный конус требуемой формы, с точки зрения минимизации глубины утяжины.

- результаты промышленного эксперимента хорошо согласуются с результатами, полученными при математическом моделировании. При формировании на заднем конце заготовки усеченного конуса длиной 70 мм удается минимизировать глубину утяжины и исключить обрыв кольцевого отслоения на заднем конце гильзы.

В результате разработки чертежей эскизного проекта реконструкции оборудования входной стороны трехвалкового обжимного стана были сделаны следующие выводы:

- профилирование заднего конца заготовки должно осуществляться при установившейся стадии прокатки в трехвалковом обжимном стане;
- в соответствии с кинематическим расчетом профилирование заднего конца заготовки должно осуществляться за 1–2 с, что вполне достаточно для формирования усеченного конуса на конце заготовки.

### 4.3. Оборудование и настройка прошивного стана

---

#### 4.3.1. Состав оборудования прошивного стана

Прошивной стан предназначен для прошивки сплошной заготовки в полу гильзу способом винтовой прокатки. Прошивка обеспечивает получение гильз требуемых размеров с высоким качеством наружной и внутренней поверхностей. Расположение оборудования рабочей линии прошивного стана показано на рис. 4.13.

Передний стол предназначен для приема нагретой заготовки с наклонной решетки, совмещения оси заготовки с осью прокатки и ограничения биения заготовки при прошивке. Во время прокатки на передний стол воздействует температура, вода, окалина и знакопеременные ударные нагрузки, возникающие в результате ударов быстро вращающейся заготовки. Поэтому конструкция стола должна быть простой, он должен обладать высокой жесткостью, центрировать заготовку и воспринимать ударные нагрузки. Кроме того, положение стола должно регулироваться по высоте.

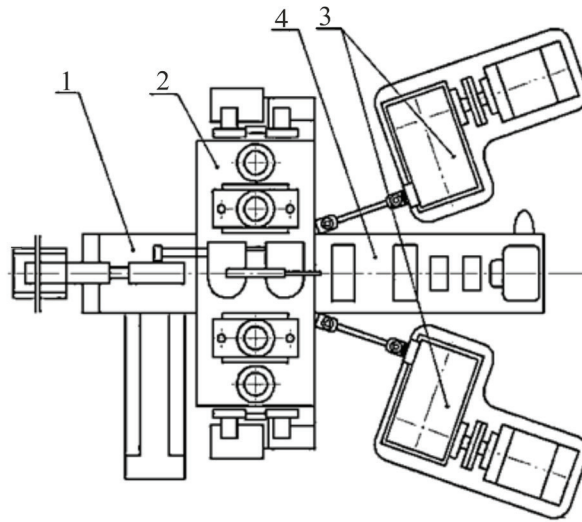


Рис. 4.13. Схема расположения оборудования прошивного стана с индивидуальным приводом валков:

1 — выходная сторона; 2 — рабочая клеть; 3 — главный привод; 4 — входная сторона

На рис. 4.14 показан общий вид и разрезы переднего стола. Для подъема желоба применяется эксцентриковый механизм, а установка желоба по оси прокатки обеспечивается сменными планками. В состав стола входят опорные стойки 1, подъемный желоб 2 и эксцентриковый механизм подъема желоба. Желоб 2 представляет собой жесткую раму, в которую установлены чугунные литые вставки 3. На раме также смонтирован механизм открывания проводок и задерживания заготовок. Этот механизм состоит из рычагов 4, жестко связанных общим валом 5, привода 6 и ограничителя 7. Конструкция механизма выполнена таким образом, что торцы рычагов в опущенном состоянии (во время прошивки) преграждают путь очередной заготовке. Нижняя сторона рычагов в опущенном состоянии образует с желобом замкнутый контур, обеспечивая центрирование заготовок. К достоинствам этого механизма относится простота конструкции и возможность установки его непосредственно у желоба, что в большинстве случаев позволяет сократить время подачи заготовок в стан. Эксцентриковый механизм включает два вала 8 с эксцентриками 9, покоящимися в подшипниках 10, которые вмонтированы в стойки 1. Каждый эксцентрик в механизме регулирования положения стола выполнен составным, т. е. из собственного эксцентрика 10, изготовленного со-

вместно с валом, и кольца 11, между которыми находятся бронзовые втулки 12. Такая конструкция эксцентрика позволяет заменить трение скольжения между столом и эксцентриком трением качения.

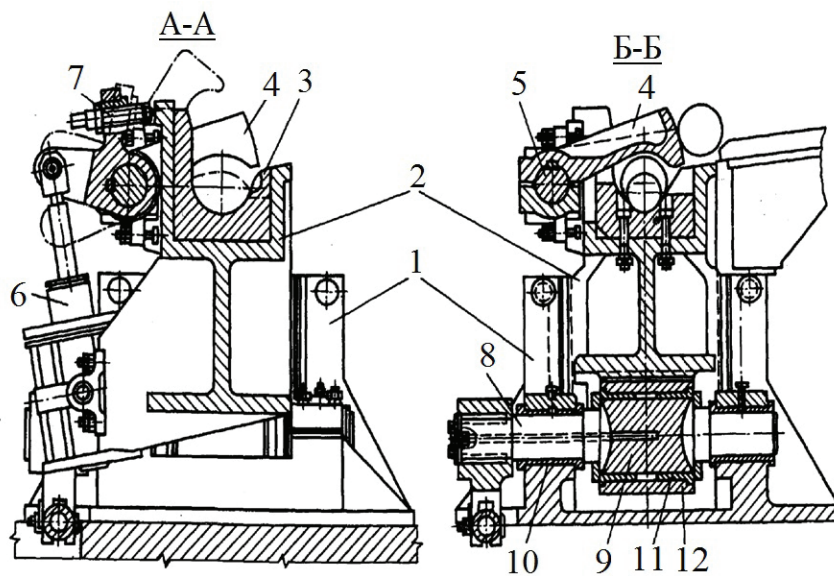


Рис. 4.14. Передний стол:

1 — опорные стойки; 2 — подъемный желоб; 3 — вставка; 4 — рычаг; 5 — вал; 6 — привод; 7 — ограничитель; 8 — вал; 9 — эксцентрик; 10 — подшипник; 11 — кольца; 12 — втулки

Вталкиватель служит для подачи заготовок по желобу в рабочую клеть. Он представляет собой длинно-ходовой пневмоцилиндр, установленный на двух стойках. На конце штока закрепляется сменный удлинитель с наконечником. Длина удлинителя и диаметр наконечника выбираются в зависимости от длины и диаметра заготовки.

Рабочая клеть стана предназначена для прошивки заготовки в гильзу и состоит из следующих узлов и механизмов: двух барабанов с установленными в них валками с подушками; двух механизмов установки валков (нажимное и уравнивающее устройства); двух механизмов поворота барабанов; механизмов установки линеек; механизма исчезающего упора; механизма подъема крыши клетки; механизма перехвата стержня; узла станины. Барабаны предназначены для изменения углов подачи, а также для установки валков. Корпус барабана устанавливается в расточку станины, на хвостовой его части имеется кольцевая выточка, в которой крепится зубчатый венец, входящий в зацепление

с вал-шестерней механизма поворота барабана и одновременно являющийся фиксатором. Рабочая клеть показана на рис. 4.15.

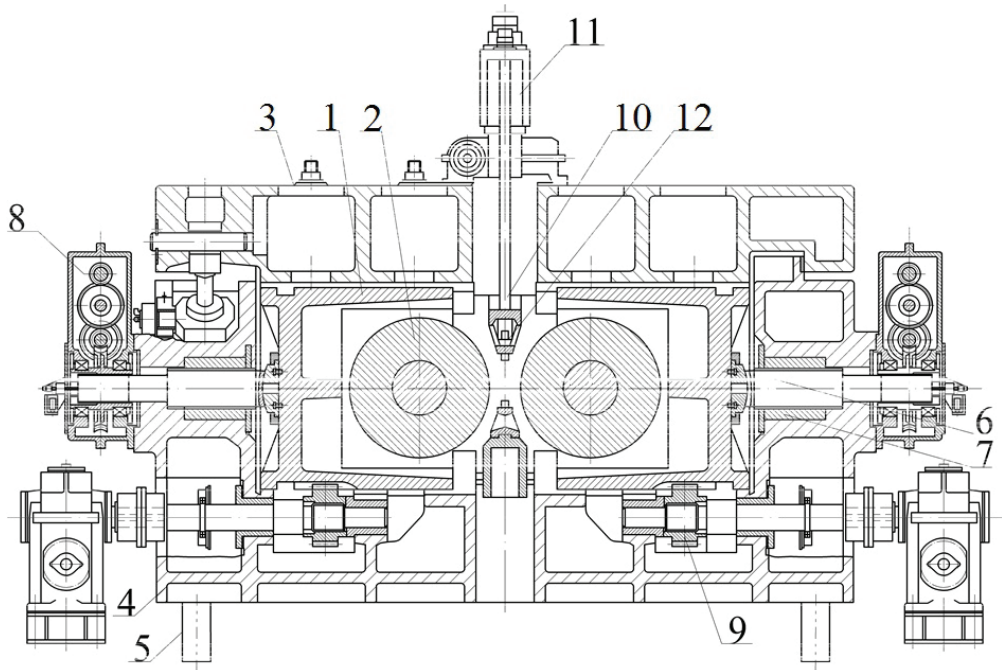


Рис. 4.15. Рабочая клеть прошивного стана:

- 1 — барабан; 2 — валок; 3 — крышка; 4 — станина; 5 — гидроцилиндр; 6 — нажимной винт;  
7 — гайка; 8 — червячный редуктор; 9 — шестерня; 10 — направляющая колонна;  
11 — траверса; 12 — линейкодержатель

Механизмы поворота барабанов служат для установки угла подачи. В расточках барабанов устанавливаются валки. Барабаны могут поворачиваться на угол от 0 до 15° с помощью электропривода через редукторы. Для ограничения крайних положений при повороте на максимальный угол предусмотрены конечные выключатели. Ограничение поворота барабана при подходе к рабочему положению не предусматривается. Стопорение барабана производится от гидроцилиндра, управляемого ручным распределителем. Установленное положение барабанов фиксируется механизмом запираания крышки, состоящего из двух механизмов перемещения засова и двух механизмов эксцентрика. Приводы механизмов перемещения засовов и эксцентриков — пневматические.

Бочка рабочего валка насаживается по горячей посадке на вал, на который также с двух сторон устанавливаются подушки с вмонти-



рованными в них четырехрядными подшипниками качения. Уплотнения подшипников со стороны бочки — лабиринтные бесконтактные, в процессе прокатки к ним периодически подается густая смазка от централизованной системы смазки. Перемещение валков осуществляется при помощи нажимного винта от электродвигателя через коническо-червячные редукторы. Для указания величины раствора рабочих валков служат сельсин-датчики и сельсин-приемники.

С торцов станины установлены два механизма стопорения барабана. Оба механизма получают перемещение от пневмоцилиндров. Механизм установки линейек состоит из нижнего стула с линейкодержателем и нижней линейки. Узел верхней линейки служит для удержания заготовки по центру прошивки в очаге деформации. Конструктивно узел верхней линейки представляет собой Т-образную траверсу, к нижней части которой крепится линейкодержатель и линейка. Траверса вместе с линейкой может перемещаться в вертикальном направлении с помощью двух винтов с упорной резьбой от электродвигателя через червячные редукторы. Вторым конец вала двигателя соединен через редуктор с сельсин-датчиком, один оборот которого соответствует 1 мм перемещения верхней линейки. Крепление верхней линейки, так же как и нижней, осуществляется с помощью рычажного механизма.

Механизм перехвата стержня с оправкой предназначен для сокращения вспомогательного времени прошивки и удержания стержня с оправкой в момент открывания упорно-регулирующего механизма и транспортирования гильзы через выходную сторону прошивного стана. Механизм исчезающего упора крепится на вводной проводке клетки и предназначен для удержания заготовки перед рабочими валками в вводной проводке. Механизм состоит из рычага, упорная часть которого входит в отверстие вводной проводки, преграждая путь заготовке. Вторым концом рычаг шарнирно соединен с пневмоцилиндром, установленным на крыше клетки. В расточках разъемной станины клетки размещены барабаны, в нижней половине станины — площадки для установки стула линейкодержателя.

Главный привод предназначен для вращения рабочих валков с заданными энергетическими параметрами: скоростью и крутящим моментом. Привод валков — индивидуальный, осуществляется от двух электродвигателей постоянного тока мощностью 1900 кВт. Регулирование угловой скорости рабочих валков в заданных пределах осуществляется изменением числа оборотов двигателя.



Задний стол (рис. 4.16) прошивного стана предназначен для удержания и центрирования стержня с оправкой при прокатке, а также для приема и транспортировки прокатанной гильзы.

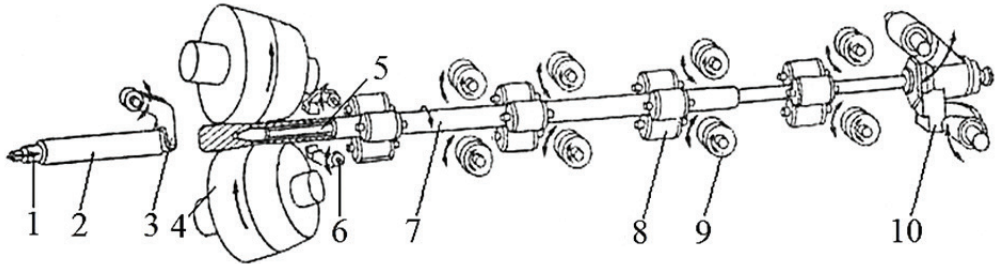


Рис. 4.16. Схема современного прошивного стана с осевой выдачей труб:

1 — вталкиватель; 2 — заготовка; 3 — упор; 4 — валки рабочей клетки; 5 — стержень с оправкой; 6 — механизм перехвата стержня; 7 — гильза; 8 — центрователь; 9 — ролики выдающие; 10 — упорно-регулирующий механизм

Прошивной стан работает с применением коротких оправок, укрепленных на конце стержня. На заднем столе установлены роликовые центрователи стержня, которые поддерживают и центрируют стержень как перед прошивкой, так и в процессе прошивки, когда на него действуют высокие осевые усилия и возможен его продольный изгиб.

За центрователями установлен стационарный упорно-регулирующий механизм, служащий для восприятия осевых усилий, действующих на стержень с оправкой, и для корректировки положения оправки в очаге деформации, с открывающейся головкой для пропуска гильзы за пределы выходной стороны. В рабочем положении упорная головка закрыта и фиксируется замком. Упорная головка поворачивается в исходное положение пневмоцилиндром. Фиксация положений упорной головки осуществляется двумя бесконтактными конечными выключателями. В упорную головку упирается стержень оправки, положение которого необходимо регулировать по мере износа оправки.

**Гидросистема.** В рабочей линии прошивного стана имеются два гидроцилиндра откидывания крышки рабочей клетки и четыре плунжерных гидроцилиндра для уравнивания барабанов рабочей клетки. Подача рабочей жидкости к гидроцилиндрам осуществляется насосной установкой. Рабочее давление жидкости в системе — не более 10 МПа (100 кгс/см<sup>2</sup>).

*Системы охлаждения и смазки.* Система охлаждения предназначена для подачи воды с целью наружного охлаждения рабочих валков, оправки, центрирующих и выдающих роликов.

*Система смазки.* Большинство узлов трения стана смазываются с помощью централизованных систем подачи жидкой и густой смазки. Смазочное оборудование централизованных систем расположено в маслоподвалах.

### 4.3.2. Описание работы стана

Мерная заготовка рольгангом за ножницами или обжимным станом движется до упора, после чего выбрасывателем передается на решетку перед двухвалковым прошивным станом, по которой скатывается к задержнику и при готовности заднего стола передается в желоб, который закрывается крышкой. С помощью вталкивателя при поднятом упоре заготовка подается в очаг деформации, где осуществляется прошивка заготовки на оправке, удерживаемой стержнем. Стержень упирается в стакан упорной головки УРМ. Продольный изгиб стержня от осевых усилий, возникающих при прокатке, предотвращается закрытыми трехроликовыми центрователями стержня.

В рабочем положении ролики сводятся к стержню пневмоцилиндром. По мере приближения переднего торца гильзы ролики центрователей последовательно разводятся. После окончания прошивки заготовки фрикционные ролики перемещают гильзу от валков для возможности захвата стержня рычагами перехватчика. Затем открывается замок и откидывается упорная головка, фрикционные ролики сводятся и гильза на повышенной скорости выдается за упорную головку на рольганг за прошивным станом.

### 4.3.3. Настройка прошивного стана

Настройка прошивного стана производится вальцовщиком стана. Рабочие валки одного комплекта должны быть одного диаметра. Расстояние между валками и линейками замеряется при отключенном главном приводе с помощью кронциркуля и металлической линейки с ценой деления 1 мм. Замерив фактические расстояния между валка-

ми и линейками, зафиксированы показания сельсин-указателей. При последующих перестройках прошивного стана, связанных с заменой линеек, выбросом недоката, переходом на другой размер и т. д. в целях ускорения настройки стана расстояние между валками и линейками устанавливается, ориентируясь на показания сельсин-указателей. В процессе перестроек стана и периодически (1–2 раза в смену) вальцовщик обязан проверять фактические расстояния между валками и линейками.

Перевалки прошивного стана производят по указанию мастера проката с применением бирочной системы под руководством старших вальцовщиков. В перевалках принимают участие вальцовщики, слесари по ремонту оборудования, слесари маслохозяйства, слесари коммуникаций, электромонтеры, операторы постов управления, машинисты электромостовых кранов. Запуск после перевалки производится по указанию мастера, который предварительно должен получить от старших вальцовщиков всех участков стана извещение о готовности к работе и об отсутствии в опасных зонах людей. При остановке стана на перевалку старший вальцовщик с пульта управления производит следующие операции:

- отключает главный привод;
- отключает электрооборудование входной стороны;
- разводит нажимные винты рабочих валков в крайнее положение;
- переключив привод упорного подшипника в ручное управление, отводит упорный подшипник со стержнем в крайнее заднее положение;
- отключает электропривод оттаскивающего ролика;
- поднимает крышки на выходной стороне и стопорит ее в поднятом положении специальным упором;
- поднимает траверсу с платформой;
- ставит все рукоятки на пульт управления в нулевое положение;
- электромонтеры ТПА отключают электрооборудование вспомогательных механизмов стана, передают бирки на право включения мастеру;
- электромонтеры машзала производят разборку схемы питания главного привода стана и передают бирку на право включения мастеру.

Разборка рабочей клетки при перевалках производится в следующей последовательности:

- слесари по ремонту оборудования отсоединяют от барабанов тяги оттаскивающего устройства и выводят их за пределы проема рабочей клетки, чтобы они препятствовали подъему барабанов;
- вальцовщики ослабляют винт установки угла рабочих валков;
- слесари коммуникации отключают подачу воздуха на все пневмоприводы стана и передают бирку на право их включения мастеру. Он же отключает подачу охлаждающей воды на валки и стержень, отсоединяет шланг подвода воздуха от цилиндра исчезающего упора;
- старший вальцовщик отключает рубильник цепи питания привода подъема траверсы с платформой, находящейся на станине;
- вальцовщики выбивают и убирают клинья и шайбы крепления крышки к станине. При выбивании клиньев следует соблюдать осторожность, чтобы не травмировать окружающих;
- слесари по ремонту оборудования совместно с вальцовщиками снимают крышку и укладывают ее на специальные подставки;
- слесари по ремонту оборудования под руководством бригадира слесарей поворачивают соединительные шпиндели и устанавливают их в таком положении, при котором «лопатки» шпинделей, со стороны рабочих валков, займут вертикальное положение. Поворот осуществляется за соединительную муфту с помощью электромостового крана. Поворот шпинделей путем включения главного привода стана запрещается;
- слесари по ремонту оборудования устанавливают в специальные отверстия в верхней части барабанов рым-болт. Контроль за надежной установкой рым-болтов возлагается на бригадира слесарей. Слесари по ремонту оборудования с помощью электромостового крана убирают поочередно оба барабана с рабочими валками и выставляют их на перевалочную площадку. При подъеме барабанов с валками бронзовые ползуны устанавливаются на лопатках шпинделей и для предотвращения их падения надежно крепятся. Подъем следует производить осторожно;
- с помощью электромостового крана убираются и укладываются в специально отведенные места вводная воронка и желоб. Эта работа производится только в случае необходимости.

Сборка рабочей клетки прошивного стана производится в обратной последовательности. На выходной стороне при перевалках производятся следующие работы:

- слесари по ремонту оборудования отсоединяют стержень от упорного подшипника;
- слесарь коммуникаций отсоединяет подвесной шланг от упорного подшипника и убирает из стержня трубку для подачи воды;
- вальцовщики с помощью элетромостового крана убирают стержень и кладут его на специальные стеллажи на выходной стороне стана. При замене стержня вручную рекомендуется пользоваться специальным кронштейном, находящимся на параллелях заднего стола во избежание падения стержня внутрь параллелей;
- вальцовщики, слесари по ремонту оборудования, слесарь коммуникаций в последовательности, обратной изложенной выше, ставят новый стержень в упорный подшипник;
- замену нижних проводок и вкладыша на выходной стороне стана производят два вальцовщика вручную.

Настройка прошивного стана включает следующие операции:

- проверка совпадения оси прошивки с осью заготовки и гильзы;
- установка рабочих валков и стержня с оправкой в положение, обеспечивающее обжатие заготовки валками в пережиме и перед носком оправки в соответствии с указанными в таблице величинами;
- проверка параллельности осей валков в горизонтальной плоскости;
- установка требуемого угла наклона валков;
- подбор и установка сменного оборудования в соответствии с размерами прокатываемых труб.

Проверка правильности настройки стана производится на первых двух гильзах, поверхность которых осматривают и измеряют их наружный и внутренний диаметры, а также косвенно контролируют толщину стенки гильзы. Если размеры гильзы отличаются от указанных размеров в таблице, то производят подстройку стана.

Установку оправки производят в следующей последовательности:

- с помощью измерительной линейки от носика оправки откладывают расстояние, соответствующее значению в вальцетабеле и делают на стержне отметку мелом;
- с помощью тянущих роликов подают стержень вперед и закрывают упорную головку, после чего обратным включением тянущих роликов плотно вводят хвостовик стержня в стакан упорной головки;

- прикладывают измерительную линейку к торцам бочек валков;
- перемещением каретки упорно-регулирующего механизма совмещают меловую отметку на стержне с измерительной линейкой, приложенной к торцам бочек валков;
- учитывая в процессе работы выборку люфтов в упорно-регулирующем механизме, после совмещения меловой отметки на стержне с измерительной линейкой необходимо подать стержень вперед на 2–5 мм.

Угол подачи устанавливают по шкале углов, нанесенной на барабанах, путем поворота барабанов. При этом большее значение угла подачи применяют для новых валков. По мере износа валков в целях улучшения захвата заготовки угол подачи снижают до  $9^\circ$ . Размеры прошивных оправок и стержней по диаметру подбирают в соответствии с таблицей проката. После каждой смены технологического инструмента перестройки стана вальцовщик обязан в первых гильзах проверить их геометрические размеры по прибору «Диаметр — 1», установленному на пульте управления. Если они не соответствуют таблице прокатки, то необходимо произвести корректировку настройки стана. Необходимые значения размеров гильзы добиваются различными способами настройки стана, приведенными в табл. 4.1. Гильзы не должны иметь дефектов прошивки. При установившемся процессе контроль диаметра гильзы рекомендуется производить через каждые 200 штук.

Вальцовщик прошивного стана самостоятельно выбирает тот или иной способ корректировки настройки стана в зависимости от корректируемых условий работы, технического состояния стана, состояния валков. Во время прошивки может случиться заполировка валков, что приводит к прекращению процесса прошивки. Заполировке валков способствуют следующие отступления от технологического процесса:

- увеличение установки оправки;
- уменьшенное или увеличенное обжатие заготовки в пережиме валков;
- разные углы подачи валков;
- частота вращения валков и углы подачи значительно превышают величины, рекомендуемые технологической инструкцией;
- разные диаметры валков;
- уменьшенное расстояние между линейками;
- несоответствие технологической оснастки стана размеру заготовки и гильзы;

- недостаточная подача воды на инструмент;
- не отрегулирована подача воздуха на вталкиватель заготовки;
- большое смятие переднего торца заготовки.

Таблица 4.1

**Порядок настройки прошивного стана  
для корректировки геометрических размеров гильзы**

№ п/п	Корректировка размеров гильзы	Порядок настройки прошивного стана
1	Увеличить диаметр гильзы	1) увеличить расстояние между линейками; 2) уменьшить выдвижение носика оправки за пережим; 3) увеличить расстояние между валками и линейками; 4) заменить оправку на больший размер.
2	Увеличить толщину стенки	1) заменить оправку на меньший размер; 2) уменьшить выдвижение носика оправки за пережим; 3) развести валки.
3	Уменьшить диаметр гильзы	1) уменьшить расстояние между линейками; 2) увеличить выдвижение носика оправки за пережим; 3) заменить оправку на меньший размер; 4) уменьшить расстояние между валками и линейками.
4	Уменьшить толщину стенки	1) заменить оправку на больший диаметр; 2) уменьшить расстояние между валками; 3) увеличить выдвижение носика оправки за пережим

При возникновении заполировки валков вальцовщику необходимо проверить и установить согласно технологической инструкции настройку стана, температуру прошивки и немедленно приступить к располировке валков.



## 5. Способы изготовления непрерывно-литой заготовки

---

### 5.1. Конверторный способ производства стали

---

**Н**аиболее экономичным и эффективным является конверторный способ получения высококачественной стали из перепельного чугуна, усредненного по химсоставу и температуре после доменной печи в миксере. Высокого качества стали этим способом добиваются благодаря низкому содержанию цветных металлов, внедрению технологии десульфурации чугуна, дополнительной десульфурации и дефосфорации жидкой стали при обработке в ковше-печи. В результате обеспечивается низкое содержание вредных примесей серы и фосфора менее 0,01 %. Рациональное раскисление, легирование, модифицирование и вакуумирование стали способствует снижению количества неметаллических включений, их модифицированию, уменьшению размера зеренной структуры и разнотерности в непрерывно-литых заготовках. Революционизирующее воздействие на металлургию производства стали оказало внедрение машин непрерывного литья заготовок. Достигнуты высокая скорость разлива, освоено производство непрерывно-литых слитков различной формы поперечного сечения (прямоугольные, квадратные, круглые и даже фасонные), снижение степени вторичного газонасыщения стали в металлопроводах стальковш — промковш — кристаллизатор, благодаря чему уменьшается пористость. Благодаря оптимизации температурно-скоростного режима кристаллизации стали на МНЛЗ получают литые заготовки с плотной макроструктурой без образования паукообразных трещин в осевой зоне слитка.



### Технология получения стали из ванадиевого чугуна

Технология конверторного способа производства стали усложняется в случае высокого содержания в чугуне ванадия. Поэтому ванадиевый чугун подвергается дополнительной продувке в конверторе. В результате получают ванадиевый шлак ( $V_2O_5$ ), который является товарным продуктом, и полупродукт с содержанием углерода (2,8–3,7) %. Полупродукт обрабатывается на установке десульфурации, а затем продвывается во втором конверторе, где получают сталь с заданным содержанием по углероду (рис. 5.1).

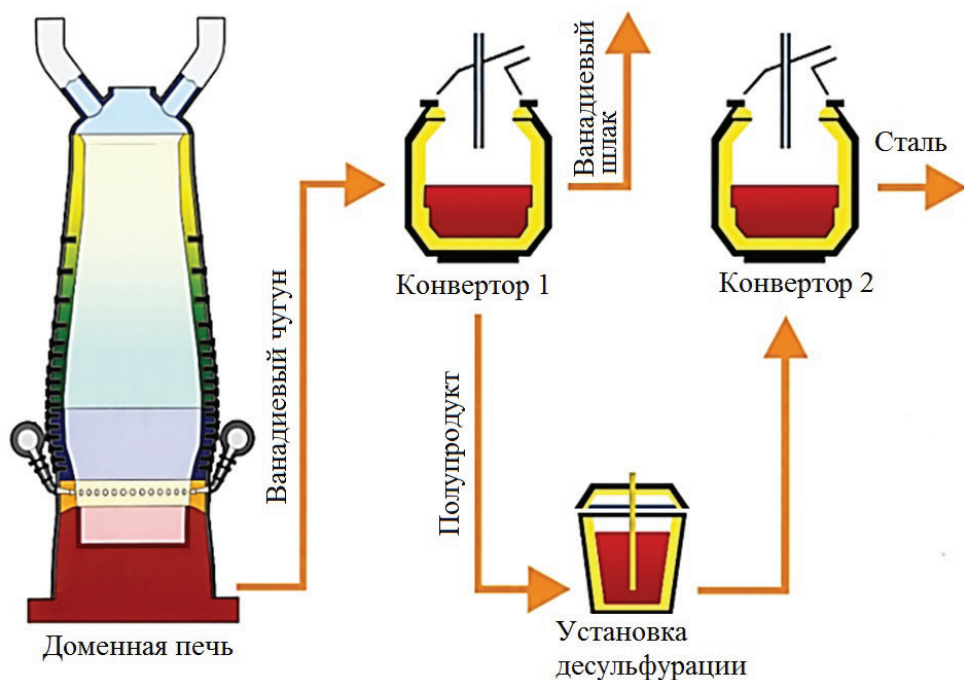


Рис. 5.1. Технологическая схема десульфурации

В конверторе 1 конструктивно обеспечивается продувка кислородом через верхнюю шестисопловую фурму с интенсивностью до  $500 \text{ м}^3/\text{мин}$  и донные фурмы для продувки инертным газом с расходом  $12,6 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Внедрение комбинированной продувки обеспечило более высокую в сравнении с верхней продувкой стабильность результатов деванадизации стали от плавки к плавке, более низкую окисленность металла, потери металла со шлаком и меньший расход ферросплавов.

Однако снижение окисленности шлака при комбинированной продувке приводит к ухудшению шлакообразования, получению гетерогенных шлаков и к ухудшению процесса дефосфорации, особенно при выплавке высокоуглеродистых сталей. В связи с этим разработан рациональный режим продувки и присадки шлакообразующих материалов для выплавки высокоуглеродистого металла (рис. 5.2). Как видно из рис. 5.2, режим присадки шлакообразующих состоит из трех этапов: первая порция шлакообразующих материалов (извести, обожженной кремнийсодержащей добавки (ОКД), марганцевого агломерата и магнезиального флюса (ФОМИ) присаживается одновременно с началом продувки; вторая порция присаживается после израсходования 25 % необходимого на плавку кислорода, подавляя развитие выбросов шлакометаллической эмульсии при опускании фурмы на рабочий уровень; третья порция, состоящая из магнезиального материала, присаживается после израсходования 80–85 % необходимого на плавку кислорода.

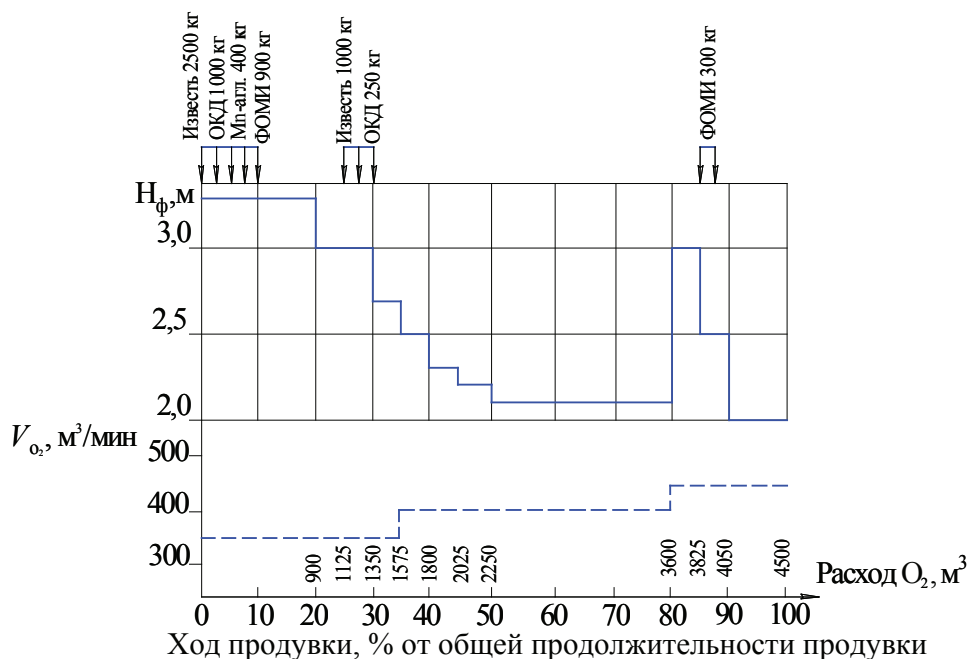


Рис. 5.2. Режим продувки и присадка шлакообразующих материалов при выплавке колесных марок стали

Дополнительно, с целью обеспечения гарантированно низкого содержания фосфора в металле, в период присадки третьей порции осущест-

вляется кратковременный (5 % заданного расхода кислорода) подъем продувочной фурмы над ванной и последующим опусканием на рабочий уровень. В ходе освоения технологии выплавки отрабатывался также режим донной продувки инертным газом, совмещенный с кислородной продувкой. Было установлено, что при выплавке высокоуглеродистого металла для улучшения шлакообразования расход инертного газа целесообразно устанавливать в период кислородной продувки на минимально возможном уровне (1,5–2,0 м<sup>3</sup>/мин). Внедрение разработанной технологии в результате обеспечило применение шлаков с высокими рафинирующими свойствами и низким агрессивным воздействием на футеровку. Степень дефосфорации составила 55,4 %.

Важным достижением повышения качества стали явилось освоение технологии десульфурации полупродукта применением обработки стали гранулированным магнием и флюидизированной известью. Хотя термодинамические условия для удаления серы из чугуна более благоприятны, чем полупродукта, новая технология оказалась предпочтительнее в связи с меньшими капитальными затратами, более высокой производительностью процесса десульфурации и меньшими потерями ванадиевого шлака. В процессе освоения технологии десульфурации с целью снижения окисленности полупродукта были опробованы различные варианты раскисления алюминием на сливе из конвертора. При проведении промышленных экспериментов было показано, что эффективность десульфурации полупродукта зависит от скорости вдувания реагентов и продолжительности скачивания шлака из установки десульфурации на завершающей стадии процесса.

Сталь из конвертора сливается в ковш-печь и подвергается внепечной обработке. Ковш-печь оборудована водоохлаждаемой крышкой с электродами, механизацией подачи ферросплавов и сыпучих материалов для получения шлака, а также порошковой и алюминиевой проволоки для легирования, раскисления и модификации стали. Имеется вакууматор для дегазации стали и уменьшения количества неметаллических включений. В сталь-ковше в донной части устанавливаются фурмы для продувки аргоном, которая стимулирует процессы усреднения расплава по химическому составу стали и температуре, десульфурации, уменьшения числа и модификации неметаллических включений. После получения стали заданного химического состава сталь-ковш накрывается теплоизоляционной крышкой и устанавливается на машину непрерывной разливки стали радиального типа.

## 5.2. Технологическая схема электросталеплавильного способа производства стали и непрерывно-литых заготовок

Технологическая схема производства стали рассмотрена на примере электросталеплавильного цеха ОАО «Первоуральский новотрубный завод». В состав комплекса входят следующие основные металлургические агрегаты: электродуговая печь (ДСП) (рис. 5.3) емкостью 120 тонн с эркерным выпуском, установка ковш-печь (УКП) (см. рис. 5.4), двухкамерный вакууматор стали (УВОС) (см. рис. 5.5) и две разливочные машины: пятиручьева диаметром заготовки 150 мм и трехручьева диаметром до 600 мм. Для обеспечения производства круглых непрерывно-литых заготовок в состав электросталеплавильного комплекса входят: скрапной двор емкостью до 27 тыс. т металлолома; известково-обжиговое отделение производительностью до 300 тонн обожженной извести в сутки; участок замедленного охлаждения непрерывно-литых заготовок.

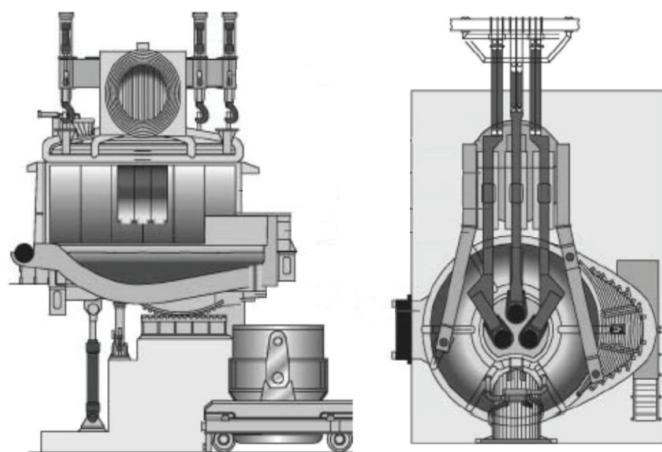


Рис. 5.3. Электродуговая сталеплавильная печь с эркерным выпуском

Отделение внепечной обработки располагается в электропечном пролете. В состав отделения внепечной обработки входят агрегат комплексной обработки стали и агрегат вакуумной дегазации стали (см. рис. 5.6). В печном пролете также расположены разливочные площадки двух МНЛЗ с подъемно-поворотными стендами. С помощью трех кранов производят все основные операции по обеспечению

передачи стальковшей и промковшей для всех агрегатов (ДСП, УКП, вакууматор и две МНЛЗ). Для исключения остановки технологической передачи жидкого металла в случае ремонта одной из МНЛЗ используется передаточная тележка.

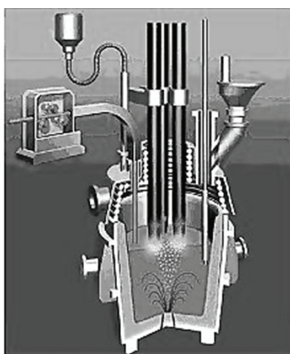


Рис. 5.4. Ковш-печь для получения стали заданного качества



Рис. 5.5. Камерный вакууматор

Участок ремонта футеровки сталеразливочных и промежуточных ковшей выделен в отдельное помещение и располагается параллельно электропечному пролету. Грузопотоки стальковшей и промковшей осуществляются двумя независимыми транспортировочными тележками.

Участок машин газовой резки и участок передаточных рольгангов обеих МНЛЗ находится в пролете, расположенном перпендикулярно электропечному пролету и пролету отгрузки литой заготовки. Это позволило уменьшить высоту здания от основного пролета до пролета отгрузки в два раза и снизить стоимость металлоконструкций цеха.

В пролете отгрузки литой заготовки размещены шагающие холодильники МНЛЗ и средства замедленного охлаждения НЛЗ.

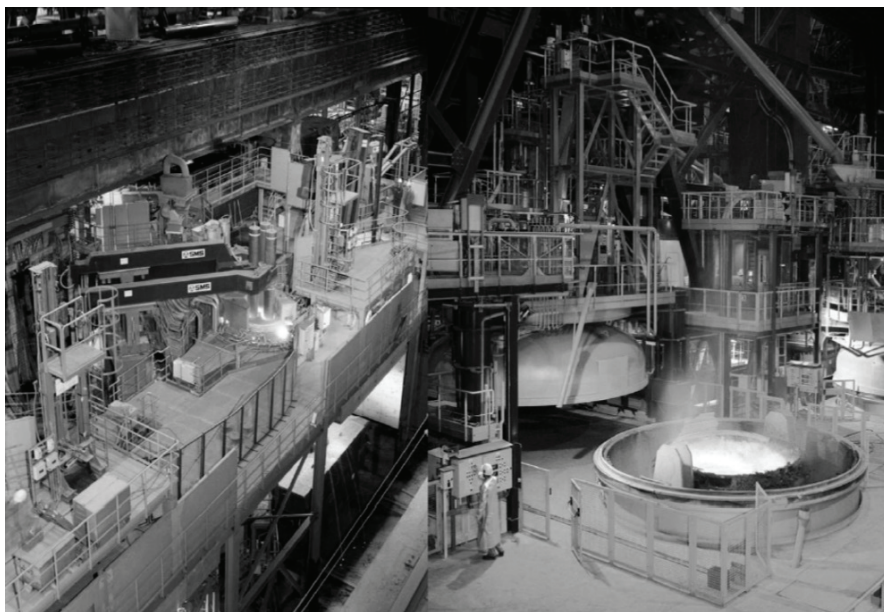


Рис. 5.6. Технологический комплекс — внепечная обработка стали на установке ковш-печь и камерном вакууматоре

В комплекс включена система автоматизации, состоящая из трех уровней автоматизации, которая позволяет производить постоянную оптимизацию управления технологическим процессом. Вся информация по ЭСПЦ доступна технологическому персоналу с целью своевременного предупреждения возможных нарушений технологического процесса. Технологическая схема производства стали в ЭСПЦ включает в себя **три этапа**: этап 1 — выплавка полупродукта в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). В процессе выплавки полупродукта в ДСП производится расплавление металлошихты, удаление фосфора и окисление углерода (до нижнего предела марочного состава); этап 2 — внепечная обработка стали на агрегате ковш-печь и установке вакуумной обработки стали. В процессе внепечной обработки производится доводка металла по химическому составу, удаление серы, удаление неметаллических включений, а также модифицирование стали. Ферросплавы и шлакообразующие материалы в ковш-печь подаются по специальной системе подачи сыпучих материалов, а порошковая и алюминиевая



проволока подается в ковш трайб-аппаратами. В процессе внепечной обработки производится непрерывная продувка металла в сталь-ковше аргоном для усреднения расплава по химическому составу стали и температуры. В процессе вакуумирования стали производится дегазация — из стали удаляются водород, азот и кислород; этап 3 — разливка стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ № 1 или МНЛЗ № 2). Технологический процесс непрерывной разливки стали выполняется автоматически (за исключением начальной фазы — запуск машины). Режим разливки стали на МНЛЗ серийный — «плавка на плавку». Серийность обеспечивается графиком выпуска полупродукта из ДСП, внепечной обработки стали на АКП и УВОС и наличием двухпозиционного подъемно-поворотного станда (ППС) на МНЛЗ № 1 и 2 для установки сталеразливочных ковшей с металлом перед началом разливки плавки. После окончания внепечной обработки металла на АКП или на УВОС сталеразливочный ковш устанавливается на свободную позицию ППС. На ковш устанавливается гидроцилиндр шиберного затвора, ковш накрывается теплоизоляционной крышкой, после чего ППС перемещает ковш в позицию разливки. Жидкая сталь из сталеразливочного ковша разливается, равномерно распределяясь по литьевым ручьям с помощью промковша.

Промежуточный ковш представляет из себя емкость дельтаобразной формы с установленными в днище стаканами-дозаторами и стопорами-моноблоками для регулирования потока металла в кристаллизаторы. После установки сталеразливочного и промежуточного ковша в позицию разливки и открытия шибера начинается наполнение промежуточного ковша жидким металлом до заданного уровня, а затем после открытия стопорами стаканов-дозаторов промковша наполняют кристаллизаторы жидкой сталью. Кристаллизатор состоит из внешнего корпуса и установленной внутри него изогнутой конусной гильзой с зазором для водяного охлаждения между ними. Гильза изготавливается из специального сплава на основе меди (Cu—Ag) с внутренним хромистым покрытием. Внешний корпус кристаллизатора состоит из коррозионно-стойкой стали с механически обработанной внутренней поверхностью. Все кристаллизаторы оснащены электромагнитной мешалкой с целью получения плотной и равномерной структуры стального слитка. Кристаллизатор предназначен для приема и удержания жидкой стали и для формирования корочки металла. Кристаллизатор устанавливается на стол качания. Конструкция кри-

сталлизатора самоцентрирующаяся, что позволяет быстро выполнять его замену. Все соединения линий водяного охлаждения автоматически уплотняются в момент установки кристаллизатора на столе качания. Кристаллизатор оборудован системой автоматического поддержания уровня металла и системой смазки рабочей поверхности гильзы. В качестве смазки используют шлакообразующие смеси (ШОС) для разливки стали закрытой струей или минеральные масла для разливки стали открытой струей. Узел качания кристаллизатора обеспечивает:

- более равномерное распределение смазки по поверхности;
- получение качественной поверхности заготовки;
- увеличение срока службы гильзы кристаллизатора за счет уменьшения трения между стальной заготовкой и медной гильзой.

Качание кристаллизатора происходит вдоль радиуса литья с регулируемой амплитудой и частотой. Реальная траектория качания кристаллизатора совпадает с теоретической в строго определенных пределах. После наполнения кристаллизатора жидким металлом до заданного уровня происходит автоматический запуск ручья: включается механизм качания кристаллизатора, подача воды на вторичное охлаждение, вытягивание заготовки введенной в нижнюю часть кристаллизатора затравкой. Затравка обеспечивает запуск ручья за счет того, что вначале удерживает жидкую сталь в кристаллизаторе (образуется временное дно), а затем заготовка протягивается по всем поддерживающим роликам. Присоединение головки затравки к заготовке происходит с помощью расходуемого металлического холодильника (замораживателя), обеспечивающего его быстрое отсоединение. Тянуще-правильный агрегат (ТПА) обеспечивает многорадиусное выпрямление заготовки на границе твердой и жидкой фаз, исключаящее образование как междендридных, так и поверхностных трещин. Первичное охлаждение отливаемой заготовки происходит в кристаллизаторе за счет отдачи тепла жидкого металла гильзе кристаллизатора. Сформированный таким образом слиток-заготовка выводится из кристаллизатора с заданной регулируемой скоростью, и внутренняя кристаллизация слитка завершается под воздействием водяного охлаждения в закрытой камере, именуемой зоной вторичного охлаждения (ЗВО). Конструкция системы вторичного охлаждения основывается на математической модели затвердевания и теплопередачи. Охлаждение заготовки в ЗВО производится с помощью расположенных в ней водораспылительных форсунок.



## 6. Повышение качества стали, непрерывно-литых заготовок и труб

---

**У**меньшение бракованной продукции, не соответствующей требованиям стандартов по состоянию поверхности изделий, точности размеров, уровню механических свойств, всегда является комплексной проблемой производства, т. к. зависит от большого числа факторов, определяющих уровень технологического процесса при получении жидкой стали, непрерывно-литой заготовки, обработки металлов давлением, отделки и термической обработки изделий. В этой главе комплексный подход к решению сложной проблемы продемонстрирован результатами исследования и совершенствования технологии внепечной обработки стали, непрерывной разливки и получения высококачественных заготовок, а также совершенствованием процесса прошивки.

### 6.1. Освоение технологии внепечной обработки стали

---

Основная задача внепечной обработки стали заключается в осуществлении технологических операций: выравнивание температуры и усреднение химического состава металла в объеме ковша с колебанием химических элементов от плавки к плавке в узких пределах; легирование; микролегирование и модифицирование; удаление и модифицирование неметаллических включений; десульфурация металла; дегазация металла (удаление водорода и азота). Одной из наиболее важных задач в ходе освоения технологии внепечной обработки стали являлось модифицирование и предотвращение образования неметаллических включений. Было установлено, что модифицирование стали силикокальцием позволяет перевести неметаллические включения

в благоприятную глобулярную форму. Модифицирование стали осуществлялось путем ввода алюминиевой проволоки и проволоки с силикокальциевым наполнителем, которые осуществляются в определенной последовательности введения модификаторов и поддержания оптимального соотношения кальция к алюминию  $\text{Ca}/\text{Al} = (0,10-0,14)$ . При смещении этого соотношения в меньшую сторону (за счет уменьшения содержания кальция или увеличения содержания алюминия) ухудшается разливаемость стали на МНЛЗ. Процесс модифицирования различных неметаллических включений при обработке силикокальцием представлен на рис. 6.1. Сульфиды превращаются во включения в виде  $\text{CaS}$ , а включения  $\text{Al}_2\text{O}_3$  модифицируются в глобулы, содержащие алюминат кальция.

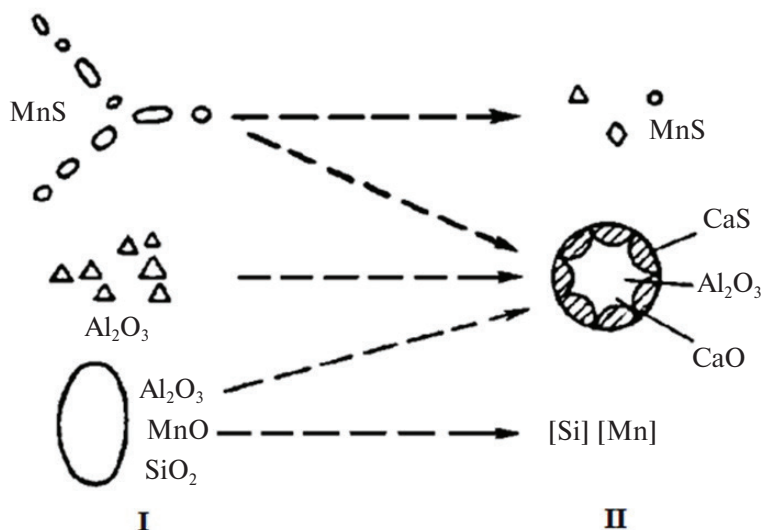


Рис. 6.1. Модифицирование неметаллических включений обработкой силикокальцием:

I — без обработки; II — с обработкой силикокальцием

Разработанная технология обработки металла силикокальцием обеспечивает модифицирование алюминатных неметаллических включений, способствует их удалению и повышению жидкотекучести стали.

Для уменьшения как общей загрязненности стали неметаллическими включениями, так и загрязненности высокоглиноземистыми включениями разработана технология безалюминиевого раскисления. В этом случае раскисление стали осуществляется за счет ввода

кремний- и марганецсодержащих ферросплавов. При этом содержание [Al] в готовой стали не превышает 0,005 %, а содержание [Ca] составляет 0,0010–0,0020 %.

Повышению качества стали способствует продувка аргоном. Вдувание аргона в днище ковша во время внепечной обработки стали позволяет обеспечить усреднение по температуре и химическому составу; десульфурацию стали; всплытие и адсорбцию шлаком неметаллических включений, а также снижение газонасыщенности. На рис. 6.2 представлено изменение содержания общего кислорода в периоды внепечной обработки, вакуумирования и разливки стали на МНЛЗ. Моменты отбора проб: 1 — перед началом обработки на ковше-печи; 2 — середина обработки на ковше-печи; 3 — в конце обработки на ковше-печи; 4 — перед вакуумированием; 5 — на 7 минуте вакуумирования; 6 — на 12 минуте вакуумирования; 7 — после вакуумирования; 8 — во время разливки на МНЛЗ. Из рис. 6.2 видно, что за счет введения в сталь модификаторов и продувки инертным газом на установке ковш-печь содержание общего кислорода в жидкой стали перед вакуумированием составляет не более 60 ppm. Дальнейшее снижение содержания кислорода до 15–20 ppm происходит на установке вакуумирования.

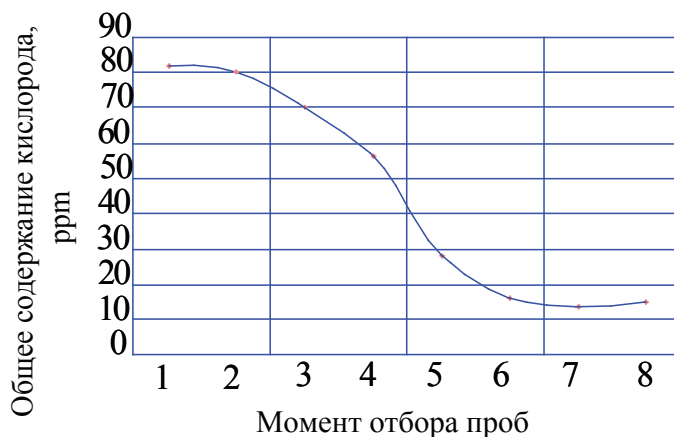


Рис. 6.2. Изменение содержания общего кислорода

Помимо снижения содержания кислорода во время вакуумирования стали происходит снижение содержания водорода и азота. Содержание водорода в вакуумированной стали не превышает 2 ppm. Гистограмма распределения содержания водорода в стали представлена на рис. 6.3.

Низкая газонасыщенность металла является объективным показателем снижения загрязненности стали неметаллическими включениями.

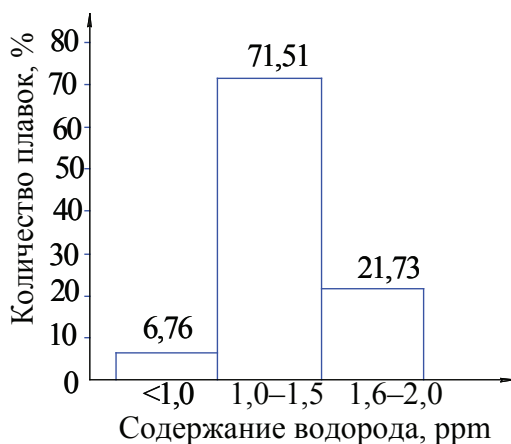


Рис. 6.3. Гистограмма распределения содержания водорода в стали

На рис. 6.4 представлена динамика снижения загрязненности колесной стали неметаллическими включениями на различных этапах модернизации технологии: 1 — выплавка в мартеновской печи и разливка в слитки; 2 — выплавка в конверторе и разливка в заготовки; 3 — выплавка в конверторе, внепечная обработка (модифицирование, продувка аргоном), вакуумирование и разливка на МНЛЗ; 4 — выплавка в конверторе, внепечная обработка, вакуумирование и разливка на МНЛЗ, внедрение безалюминиевого раскисления.

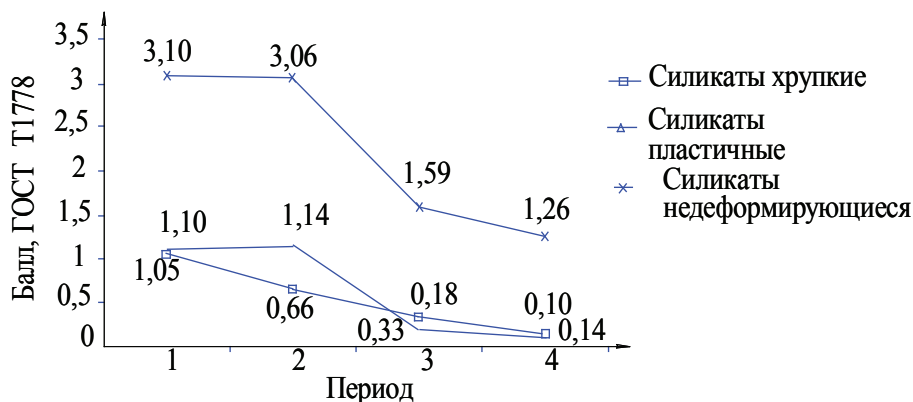


Рис. 6.4. Загрязненность колесной стали неметаллическими включениями в разные периоды модернизации технологии

## 6.2. Повышение качества непрерывно-литой заготовки

Освоение технологии непрерывной разливки стали на МНЛЗ потребовало решения технологических проблем получения слитка с плотной микроструктурой без рыхлости и макротрещин, обеспечения рационального соотношения объемов и протяженности структурных зон равноосных кристаллов и столбчатых дендритов.

### 6.2.1. Исследование образования трещин в осевой зоне слитка

При освоении технологии производства круглой заготовки сечением  $\varnothing 430$  мм на МНЛЗ уровень отбраковки по осевой трещине первоначально составлял 20 %, при этом протяженность осевых трещин составляла от 30 до 100 мм. Осевые ликвационные полосы и трещины располагались в центре непрерывно-литой круглой заготовки (рис. 6.5) и представляли собой надрывы, распространяющиеся по межосным пространствам дендритной структуры, обогащенным ликватами, скоплениями сульфидов и ликвацией фосфора. При кристаллизации стали происходит усадка металла, что приводит к росту среднего нормального напряжения  $\sigma$ . Увеличение показателя напряженного состояния  $\sigma/T$  приводит к снижению ресурса пластичности стали  $\Lambda_p$ , здесь  $T = \tau_s$  — интенсивность касательных напряжений,  $\tau_s$  — предел текучести на сдвиг.

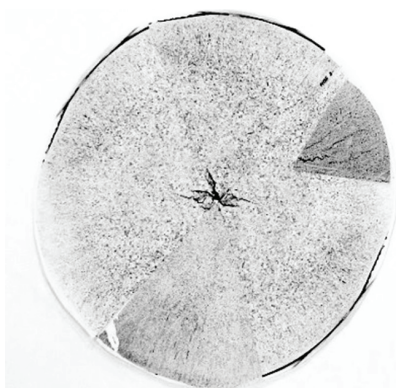


Рис. 6.5. Осевая трещина в непрерывно-литой круглой заготовке  $\varnothing 430$  мм из колесной стали

При некотором критическом значении  $\sigma/T$  происходит охрупчивание стали ( $\Lambda_p = 0$ ). Кроме того, повышается интенсивность остаточных касательных напряжений  $T^\circ$ , которая при неблагоприятных условиях достигает значения предела текучести на сдвиг  $T = \tau_s$ . В результате в осевой зоне слитка образуется хрупкая трещина. Значение  $\sigma/T$  и интенсивность остаточных касательных напряжений  $T^\circ$  зависят в основном от температуры разливаемого металла и скорости разливки. Исходя из вышеизложенного приоритетным направлением исследования с целью снижения отбраковки продукции по дефекту «осевая трещина» являлась разработка температурно-скоростного режима разливки стали на МНЛЗ, обеспечивающего высокое качество макроструктуры.

Результаты промышленных экспериментов показывают, что увеличение температуры металла выше температуры ликвидуса обуславливает увеличение градиента температуры по сечению заготовки, что приводит к увеличению протяженности зоны столбчатых дендритов, которая может достигать центра заготовки. Такая структура характеризуется низкими пластичными свойствами, высокой склонностью к образованию трещин при деформации заготовки в зоне разгиба МНЛЗ. На рис. 6.6 представлена зависимость брака по осевой трещине от температуры металла в промежуточном ковше. Видно, что при снижении перегрева металла выше температуры ликвидуса с 35–40 °С до 20–25 °С брак по осевой трещине снижается с 0,43 % до 0,12 %. Скорость разливки также является одним из главных параметров процесса. Известно, что увеличение скорости разливки выше оптимальной способствует образованию горячих трещин.

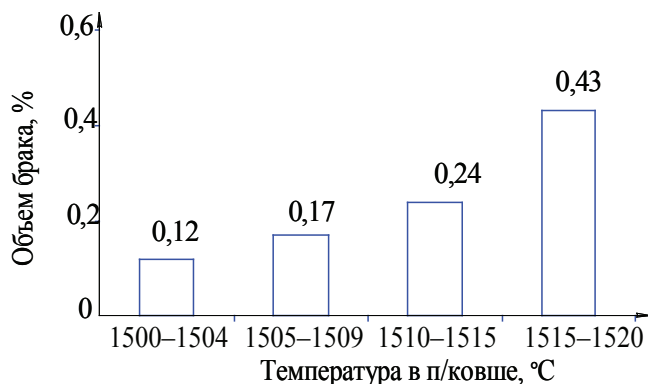


Рис. 6.6. Зависимость брака по осевой трещине от температуры металла в промежуточном ковше

На рис. 6.7 представлена зависимость брака по осевой трещине от скорости разливки.

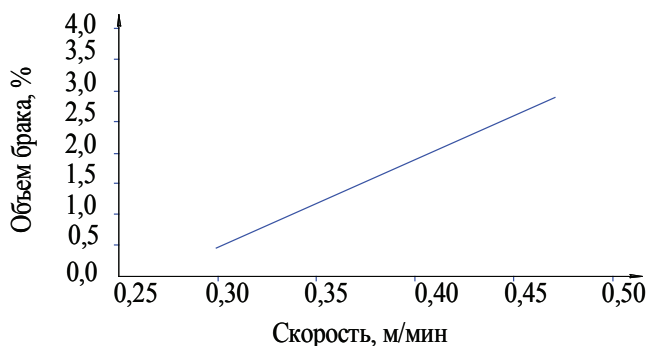


Рис. 6.7. Зависимость брака по осевой трещине от скорости разливки

При разливке круглой непрерывно-литой заготовки Ø430 мм установлены оптимальные значения: скорость разливки в пределах 0,33–0,42 м/мин; температура металла в промежуточном ковше 1500–1510 °С. Важное значение для снижения брака по осевой трещине при производстве заготовки Ø430 мм имеет рациональная схема охлаждения заготовки, направленная на создание оптимальных условий для объемной кристаллизации, расширение зоны равноосных кристаллов и обеспечивающая улучшение пластических свойств готового проката. Организация равномерного вторичного охлаждения за счет водовоздушного «тумана» и установка в зоне разгиба слитка защитных тепловых экранов способствовали повышению качества заготовок.

Внедрение рациональных температурно-скоростных режимов разливки, использование теплозащитных экранов и совершенствование системы испарительного охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения обеспечило получение плотной макроструктуры по всему сечению круглого слитка и отсутствие трещин в осевой зоне слитка.

### 6.2.2. Технические решения по уменьшению вторичного окисления стали на МНЛЗ

Следующим направлением улучшения качества металла являлось обеспечение надежной защиты стали во время разливки от вторичного окисления. Известно, что до 20 % образующихся в металле неметал-

лических включений составляют оксидные включения, образующиеся из-за неплотностей стыковки огнеупоров металлопроводов и взаимодействия металла с кислородом воздуха. Для обеспечения более надежной герметизации металла в процессе разливки, обеспечения плотного стыка огнеупоров была опробована и внедрена технология защиты от вторичного окисления с использованием адаптеров (рис. 6.8). Источником вторичного окисления металла также является применение кислорода для прожигания канала стакана шибера затвора сталеразливочного ковша. Использование стартовой смеси вместо кварцевого песка в 95 случаях из 100 исключило необходимость применения кислорода для открытия сталеразливочного ковша.

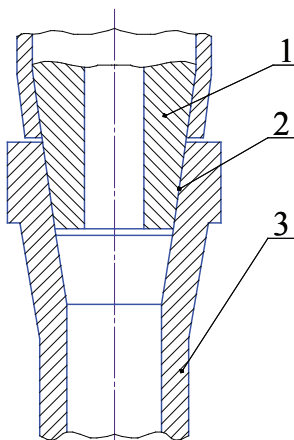


Рис. 6.8. Схема установки защитной трубы на коллектор шибера затвора:  
1 — коллектор шибера затвора; 2 — уплотнительная вставка; 3 — защитная труба

### 6.3. Исследование процесса формирования структуры и механических свойств при винтовой прокатке

---

#### 6.3.1. Структура высокопрочной стали 03X11 N10

В работах И. Н. Потапова и его учеников было показано, что процесс РСП при увеличении обжатия обеспечивает глубокую проработку структуры материала за счет развития интенсивной сдвиговой деформации. При этом в отличие от других способов деформации при



винтовой прокатке путем изменения угла подачи можно влиять на интенсивность проработки структуры стали. Однако в литературе отсутствует единый критерий оценки проработки структуры. Поэтому рациональные режимы винтовой прокатки устанавливаются для каждого конкретного случая опытным путем. Исследование структуры и механических свойств высокопрочной стали проводилось после прокатки заготовки с большим количеством внутренних и наружных дефектов металлургического происхождения на трехвалковом стане винтовой прокатки «100». В опытах коэффициент вытяжки изменялся от 1,3 до 4,5, а угол подачи — от  $5^\circ$  до  $25^\circ$ . На рис. 6.9 показана микроструктура деформированных заготовок с коэффициентом  $\lambda = 4,5$  при различных углах подачи. При малых углах подачи в осевой зоне заготовки наблюдается вскрытие полости и развитие осевой рыхлости металла. При углах подачи  $\beta = 25^\circ$  добиваются значительного уменьшения осевой пористости (не более 0,5 балла). Аналогичная закономерность выявлена при образовании высокодисперсной зеренной структуры. При малых углах подачи и коэффициентах вытяжки зона с мелкими зернами располагается в периферийной зоне поперечного сечения, а в осевой зоне наблюдаются крупные зерна. С увеличением числа подачи и коэффициента вытяжки разнотернистость исчезает.

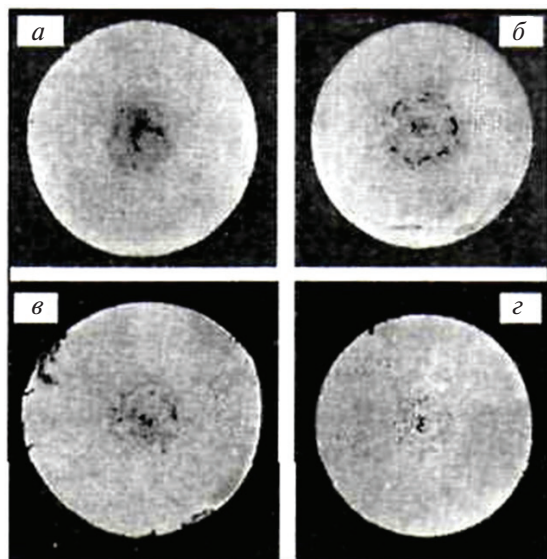


Рис. 6.9. Макроструктура деформированных заготовок при  $\lambda = 4,5$ :

*a* — при  $\beta = 5^\circ$ ; *б* — при  $\beta = 7^\circ$ ; *в* — при  $\beta = 15^\circ$ ; *г* — при  $\beta = 25^\circ$

Исследования механических свойств металла после прокатки выявили их улучшение при увеличении коэффициентов вытяжки и углов подачи. При этом с увеличением углов подачи пластические характеристики металла возрастают более интенсивно по сравнению с прочностными, что обусловлено наличием тангенциальных сдвиговых деформаций при прокатке.

### 6.3.2. Влияние предварительного обжатия непрерывно-литой заготовки на зеренную структуру

В ПАО «Синарский трубный завод» освоена новая технология производства высококачественных насосно-компрессорных труб на модернизированном трубопрокатном агрегате ТПА-80. Для повышения эффективности изготовления труб из непрерывно-литой заготовки в линии ТПА-80 был установлен трехвалковый стан и освоена технология радиально-сдвиговой прокатки (РСП). Изменение технологической схемы производства труб на агрегате представлено на рис. 6.10. Достоинством новой технологии производства горячекатаных труб является интенсивная проработка литой структуры и повышение технологических характеристик заготовки. Исследования микроструктуры катаной (диаметр 120 мм) и литой заготовки (диаметр 150 мм) после выполнения основных технологических операций (нагрев, РСП, прошивка, раскатка, редуцирование, термообработка) позволили выявить картину эволюции зеренной структуры сталей от заготовки до готовой трубы.

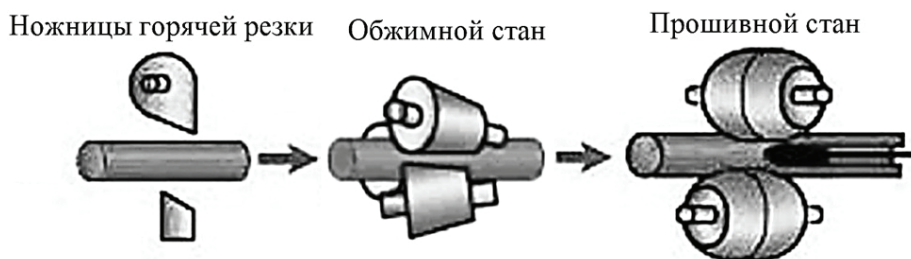


Рис. 6.10. Изменение технологической схемы производства труб на ТПА-80

При изучении микроструктуры металла труб и заготовок из марки стали 32ХГ было установлено, что применение обжатия непрерывно-литых заготовок на трехвалковом стане винтовой прокатки перед прошивкой

способствует уменьшению неоднородности деформации, интенсивной проработке крупно-зернистой дендритной структуры и уменьшению пористости в осевой зоне литой заготовки и повышению технологических характеристик металла. Размер зерна непрерывно-литой заготовки после РСП (рис. 6.12) меньше размера зерна катаной заготовки, полученной на стане «650» ОАО «НТМК», (рис. 6.11). Исходная структура непрерывно-литой заготовки представлена на рис. 6.11, *а*. Размер зерна металла готовых труб, изготовленных из непрерывно-литой заготовки, составляет 40–70 мкм, а из катаной заготовки — 100–200 мкм. Исследования механических свойств труб из стали 32ХГ показали, что дисперсия механических свойств труб, полученных по новой технологии, уменьшилась в среднем на 10 % по сравнению с дисперсией механических свойств труб, полученных с использованием катаной трубной заготовки. Благодаря этому повысилась надежность обеспечения требуемого уровня качества труб по новой технологии и уменьшился выпуск труб второго сорта из-за несоответствия уровня механических свойств требованиям стандартов.

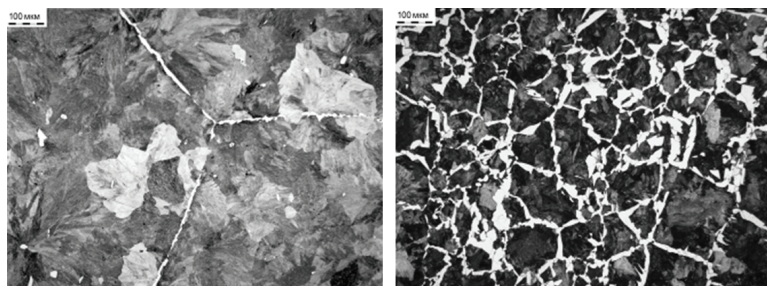


Рис. 6.11. Исходная микроструктура непрерывно-литой (слева) и катаной (справа) заготовки

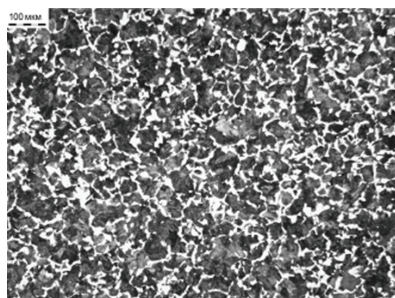


Рис. 6.12. Микроструктура непрерывно-литой заготовки после обжатия на трехвалковом стане

#### 6.4. Результаты освоения производства непрерывно-литой заготовки на ОАО «Первоуральский новотрубный завод». Оценка качества труб

На период с 2008 по 2015 гг. ЭСПЦ стал ведущим поставщиком трубной заготовки для трубопрокатных установок завода, что составляет 69,98 % от общего объема, а на долю пятнадцати других поставщиков, среди которых ОАО «ЕВРАЗ НТМК», ОАО «ОЭМК», ОАО «Мечел» и др., приходится чуть более 30 % общего объема поставки трубной заготовки. Результаты работы ЭСПЦ по освоению новых марок стали и типоразмеров заготовки в 2015 году представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

##### НЛЗ. Освоение новых марок стали и типоразмеров заготовки в 2015 году

№ п/п	Марка стали	Типоразмеры заготовки				
		Круг 150	Круг 170	Круг 220	Круг 460	Круг 550
1	8ХГФБ			+		
2	13Г1С			+		
3	13ХФА		+			
4	15Х5М	+				
5	18Х3МФБ	+				
6	20		+			
7	20А		+			
8	30ХГМА	+				
9	30ХГСА					
10	32Х1МФ	+				+
11	36ХГ2СФБ	+				
12	37Г2Ф		+			
13	T22	+				
14	K48				+	+
15	P235TR1					+

Однако выход годного и качество труб, изготовленных из непрерывно-литых заготовок, уступают соответствующим показателям в случае применения катаной заготовки. Средний по заводу уровень бракованных труб из металла ЭСПЦ составляет 1,61 и 1,81 % в 2014 и 2015 гг.

соответственно, в то время как у заготовки Оскольского электрометаллургического комбината он 0,7 и 0,33 % (табл. 6.2).

Таблица 6.2

**Распределение горячекатаных труб с несоответствиями,  
связанными с качеством**

Поставщик	Трубы с несоответствиями по качеству заготовки	
	2014 г., %	2015 г., %
Оскольский электрометаллургический комбинат	0,7	0,33
Уральская сталь	7,45	1,62
Нижнетагильский металлургический комбинат	1,13	0,59
Челябинский металлургический комбинат	1,3	0,91
Металлургический завод им. А. К. Серова	6,27	4,11
Златоустовский металлургический завод	2,09	2,19
Днепросталь	1,04	0,69
ВМЗ «Красный Октябрь»	1,1	1,57
ТД МЗ «Красный Октябрь»	1,62	2,04
ЭСПЦ «Железный Озон 32»	1,61	1,81
Уральская кузница	0,98	0,2
Электросталь	0	0,12
Союзнихром	4,03	0
Камасталь	11,28	4,26
Итого	1,6	1,7

Брак по трубам, изготовленным из заготовки поставщиков ОАО «Уральская сталь», ОАО «Металлургический завод им. А. К. Серова», ОАО «Златоустовский металлургический завод», ЗАО «ТД МЗ «Красный Октябрь», выше либо на уровне бракованных труб из непрерывно-литой заготовки. В табл. 6.3–6.5 приведены данные о выходе годной продукции и браке труб по цехам завода с различными трубопрокатными установками. Видно, что наиболее сложное положение с выходом годного продукта с первого предъявления наблюдается на ТПУ 220: в 2014 г. — 82,37 %, а в 2015 г. — 85,3 %.

Таблица 6.3

**Показатели качества продукции в цехе № 1**

Стан	Период	Выход годной продукции, %	Исправимый брак		Окончательный брак, %
			по работе, %	по металлу, %	
140—1	2015 г.	96,73	2,32	0,87	0,09
	2014 г.	96,75	1,83	1,26	0,12
220	2015 г.	85,30	5,64	9,05	0,01
	2014 г.	82,37	7,00	9,74	0,89

Таблица 6.4

**Показатели качества продукции в цехе № 5**

Участок	Период	Выход годной продукции, %	Исправимый брак		Окончательный брак, %
			по работе, %	по металлу, %	
ТПУ 160	2015 г.	94,69	3,68	0,85	0,78
	2014 г.	95,27	3,17	1,04	0,53
ХПТ	2015 г.	98,22	0,97	0,04	0,77
	2014 г.	99,12	0,35	0,10	0,89

Таблица 6.5

**Показатели качества продукции в цехе № 8**

Период	Выход годной продукции, %	Исправимый брак		Окончательный брак, %
		по работе, %	по металлу, %	
2015 г.	94,53	4,33	1,09	0,05
2014 г.	94,62	4,48	0,85	0,05

На ТПУ140—1 эти показатели соответственно равны 96,75 % и 96,73 %; на ТПУ 60 — 95,27 % и 94,69 %, а на ТПУ 30 — 102—94,62 % и 94,53 %. Для уменьшения доли окончательного брака прибегают к ремонту труб обточкой, расточкой и шлифованием, а также вырезкой дефектных участков. Брак по структуре и механическим свойствам частично удается исправить термообработкой труб.

## 6.5. Исследование влияния технологических режимов прошивки на образование дефектов на поверхности труб и уровень брака продукции

На ТПА 220 основным видом дефектов являются наружные пленны (в том числе мелкие пленны), которые составляют около половины всех несоответствий требованиям стандартов к качеству горячекатаных труб. Уровень брака по наружным пленнам зависит от качества трубной заготовки, определяемой уровнем технологии ее изготовления на заводах-поставщиках (табл. 6.6).

Таблица 6.6

**Уровень брака на ТПА 220 по наружным пленнам  
в зависимости от поставщика заготовки (для стали марки 20 за 2005 г.)**

Поставщик	Брак по наружным пленнам, %		
	исправимый	окончательный	всего
НТМК	7,26	0,10	7,36
ООО «Уральская сталь»	10,4	0,11	10,51
ОЭМК	4,14	0,03	4,17
СМЗ	9,00	0,12	9,12

Из табл. 6.6 видно, что больше всего брака по наружным пленнам — 10,51 % наблюдается на трубах, прокатанных из заготовки поставщика ООО «Уральская сталь». Для проведения исследований по влиянию состояния поверхности трубной заготовки на возникновение дефектов на наружной поверхности труб были подобраны и подвергнуты травлению 24 штанги диаметром 150 мм из стали 20 поставщика ООО «Уральская сталь». После осмотра штанги с травленной поверхностью были рассортированы на группы:

- с видимыми дефектами, допустимыми по ОСТ14–21 без огневой зачистки;
- с видимыми дефектами, допустимыми по ОСТ14–21 с огневой зачисткой;
- без видимых дефектов.

Прокатка труб размерами 159×6 мм производилась на ТПА 220 при одной настройке стана; замену инструмента в ходе прокатки не производили. Из семи забракованных труб шесть имеют несоответствия в виде мелких наружных плен. По данным металлографического ис-



следования глубина плены на образце от этих труб составляет 0,4 мм. На одной трубе обнаружена грубая наружная плена, при этом на исходной трубной заготовке была отмечена серия мелких волосовин. Таким образом, установлено, что наличие на заготовке видимых дефектов (даже допустимых по ОСТ14–21) приводит к увеличенному количеству дефектов на наружной поверхности труб.

На ТПА 220 и ТПА 30–102 была проведена работа по изучению формоизменения дефектов поверхности заготовки при изготовлении горячекатаных труб. На заготовку диаметром 150 мм из стали марок 10 и 20 были нанесены искусственные дефекты.

Таблица 6.7

**Данные осмотра труб размером 159×5 мм из заготовки диаметром 150 мм стали марки 20 поставщика — Нижнесалдинский металлургический завод**

Качество поверхности трубной заготовки	С огневой зачисткой	Без огневой зачистки	Всего
	Забраковано, %	Забраковано, %	Забраковано, %
С видимыми дефектами		12,1	12,1
Без дефектов	0,9	4,8	5,7
С обточенной поверхностью	0	0	0

На двух заготовках, предназначенных для прокатки на ТПА 220, глубина риск изменялась по линейному закону от 0 до 4 мм, а угол раскрытия составлял 45° и 90°. Глубина риски на заготовке, предназначенной для прокатки на ТПА 30–102, составляла 1,4 мм. На трубе размером 60,3×5,5 мм, прокатанной на ТПА 30–102, наружные плены не обнаружены. На образование наружных плен на трубах размером 159×5 мм, прокатанных на ТПА 220, повлияла глубина и величина раскрытия риск на заготовке. Плена на трубе возникла в месте, где ширина риски на первой заготовке была 1,4 мм, и ее глубина составила 0,71 мм; на второй заготовке — при раскрытии риски 0,36 мм и глубиной 0,44 мм. По результатам этой работы был сделан вывод о том, что для производства на ТПА 220 труб размером 159 × 5 мм без образования наружных плен глубина дефектов на заготовках не должна превышать 0,2–0,3 мм.

Из табл. 6.7 видно, что на трубах, прокатанных из обточенной заготовки, наружных плен не обнаружено. Удаление поверхностного слоя снижает вероятность образования наружных плен, что убедительно



подтверждается на примере труб, изготавливаемых из обточенной заготовки по ТУ14–3-460 и ТУ14-3Р-55 из стали марок 20 К и 20 ПВ (табл. 6.8 и 6.9). Для проверки влияния способа огневой зачистки дефектов была проведена опытная работа. Заготовки из стали марки 20 сформировали в две партии:

- 1 партия — 36 заготовок с огневой зачисткой поверхности,
- 2 партия — 40 заготовок без огневой зачистки поверхности.

Прокатку труб размером 141,3×6,55 мм осуществляли при одной настройке станов. Результаты осмотра труб приведены в табл. 6.10.

Таблица 6.8

**Данные осмотра труб из заготовки стали марок 20 К, 20 ПВ и 20**

Качество поверхности трубной заготовки	Наружные плены (в том числе мелкие), %			
	Исправимый	2 сорт	Оконч. брак	Всего
Без дефектов	21,0	4,0	6,0	31,0
Дефекты глубиной 0,4–0,8 мм	88,0	—	4,0	92,0
Дефекты глубиной 0,8–1,2 мм	82,0	18,0	—	100,0

Таблица 6.9

**Данные осмотра труб размером 194×12 мм из заготовки стали марки 10  
поставки Серовского металлургического завода**

(1985 г.) Трубная заготовка	Наружн. плены (в том числе — мелкие), %
Обычная — диаметром 190 мм	10,0
Обточенная на СМЗ до диаметра 180 мм	0,14

Таблица 6.10

**Влияние огневой зачистки заготовки на качество наружной поверхности труб**

Качество поверхности	Наружные плены, %	Мелкие наружные плены, %
С огневой зачисткой	38,9	2,7
Без огневой зачистки	10,0	7,5

Аналогичная работа проводилась на трубах из заготовки марки Д поставки Серовского металлургического завода. Данные эксперимента приведены в табл. 6.11. По результатам работ не удалось установить, сама ли огневая зачистка провоцирует образование дефектов на трубах, или ее наличие говорит о большой пораженности заготовки дефектами (даже допустимыми).

Таблица 6.11

**Влияние огневой зачистки заготовки и сортамента труб  
на качество наружной поверхности**

Вид заготовки	Размер труб, мм	Диаметр заготовки	Наруж. плены, %	Мелкие плены, %	Всего, %
С огневой зачисткой	146×4,5	150	13,6	2,2	15,8
	146×5	150	16,0	—	16,0
	219×10	210	1,0	8,6	9,6
Обычная заготовка	219×8–10	210	4,5	1,4	5,9

Учитывая, что огневая зачистка характеризует штанги с худшим качеством поверхности, то такую заготовку целесообразно задавать на ТПА 160 или под прокатку толстостенных труб (с соотношением  $D/S$  менее 15) на ТПА 220. Для этого необходимо, чтобы на предприятии-поставщике трубной заготовки, главным образом на ОХМК, где много металла идет с огневой зачисткой, штанги с огневой зачисткой были отсортированы в отдельные пакеты.

#### 6.5.1. Оценка влияния типа трубопрокатного агрегата на качество поверхности труб

Уровень пораженности труб наружными дефектами для одного и того же поставщика в большей степени зависит от типа трубопрокатной установки. В табл. 6.12 приведен сравнительный анализ качества наружной поверхности труб с трубопрокатных установок, имеющих разную степень деформации на прошивном стане.

Таблица 6.12

**Уровень брака на ТПА 220 и ТПА 160 по наружным пленам  
для стали марки 20**

Поставщик	ТПУ	Коэффициент вытяжки на прошивном стане	Наружные плены, %			
			1 кв.	2 кв.	3 кв.	4 кв.
ООО «Уральская сталь»	220	2,02–3,75	13,2	14,7	10,9	18,9
	160	1,45–1,96	2,48	3,83	3,13	2,92
НТМК	220	2,02–3,75	7,5	10,1	7,34	12,0
	160	1,45–1,96	0,58	1,07	0,26	0,76

Как видно из табл. 6.12, более низкая деформация при прошивке на ТПА 160 благоприятно сказывается на качестве наружной поверхности. Однако, помимо величины деформации, при прошивке сравниваемые агрегаты отличаются условиями нагрева заготовки (различные типы печей) и способом раскатки гильзы в трубу. Для исключения этого возможного влияния разницы технологий на качество поверхности труб была проанализирована зависимость брака по наружным дефектам от коэффициента вытяжки при прошивке только для ТПА 220. Результаты анализа приведены в табл. 6.13.

Таблица 6.13

**Качество наружной поверхности труб из стали марки 20,  
прокатанных на ТПА 220 за январь — март 2005 г.**

Коэффициент вытяжки на прошивном стане	Наружные плены, %	
	Поставщик заготовки	
	НТМК	ОХМК
4,0 и более	—	25,5
3,5—3,99	12,4	21,9
3,0—3,49	11,6	21,4
2,5—2,99	5,0	8,5
2,0—2,49	3,4	8,2
1,99 и менее	3,3	2,3

Из табл. 6.13 видно, что чем больше коэффициент вытяжки на прошивном стане, тем больше труб с пленами на наружной поверхности. Эта тенденция сохраняется для разных поставщиков металла.

### 6.5.2. Анализ влияния способов и режимов прокатки на ТПА на образование наружных дефектов

Обобщенным показателем образования дефектов на наружной поверхности труб будет коэффициент вытяжки на прошивном стане. Преобразуем его обычное написание и получим

$$\lambda = (D_3/2D_r)^2 (D_r/S_r)^2 / (D_r/S_r - 1), \quad (6.1)$$

где  $D_3$  — диаметр заготовки;  $D_r$  — диаметр гильзы;  $S_r$  — толщина стенки гильзы.

Из выражения (6.1) видно, что коэффициент вытяжки определяется тонкостенностью гильзы, характеризуемой отношением  $D_r/S_r$  и соотношением диаметров заготовки и гильзы. В табл. 6.14 приведены эти средневзвешенные характеристики по трем трубопрокатным агрегатам ОАО «ПНТЗ», оснащенным прошивными станами с бочковидными валками. В этой же таблице приведены результаты разбраковки труб из стали 20, прокатанных из трубной заготовки поставщика «Уральская сталь».

Таблица 6.14

**Средневзвешенные характеристики по трем трубопрокатным агрегатам**

Показатели	ТПА 220	ТПА 140	ТПА 160
$\mu$	3,41	2,97	1,62
$D_r/S_r$	15,0	11,9	5,4
$D_z/D_r$	0,921	0,955	0,986
Нар. плены, %	8,06	4,19	2,22

Из табл. 6.14 видно, что с увеличением коэффициента вытяжки при прошивке увеличивается и количество труб с наружными пленами. Однако помимо величины деформации при прошивке сравниваемые агрегаты отличаются условиями нагрева заготовки (различные типы печей), калибровками валков, оправок и линеек прошивных станов, а также усредненным сортаментом используемых гильз ( $D_r/S_r$ ). Для исключения этого возможного влияния разницы технологий на качество поверхности труб была проанализирована зависимость брака по наружным дефектам от коэффициента вытяжки при прошивке только для ТПА 220, тем более что на этой установке отмечается и самый высокий уровень отбраковки. Были обработаны данные по разбраковке труб диаметром от 114 до 219 мм (всего 157 типоразмеров), прокатанных из заготовки разных поставщиков. На рис. 6.13 приведена зависимость пораженности труб наружными пленами от коэффициента вытяжки при прошивке.

Из рис. 6.13 видно, что тенденция увеличения количества труб с пленами с повышением деформации при прошивке сохраняется. Поэтому представляется целесообразным уменьшать деформацию на прошивном стане. Этого можно достичь либо увеличением толсто-стенности гильзы, либо уменьшением диаметра заготовки, т. е. отношения ( $D_z/D_r$ ). Возможности первого пути на ТПА 220 крайне ограничены, т. к. потребуется увеличение деформации на автоматстане,

что лимитируется его технической характеристикой. Для установления влияния  $D_3/D_r$  на дефектность наружной поверхности труб было проанализировано качество труб размерами  $140 \times 14$  мм,  $146 \times 5 \dots 14$  мм,  $152 \times 5 \dots 14$  мм и  $159 \times 4,5 \dots 10$  мм, для прокатки которых используют заготовку диаметром 150 мм. Результаты анализа приведены в табл. 6.15, а на рис. 6.14 показана графическая интерпретация первых четырех строк. Это «граничное» значение использовали для анализа всего массива данных. Он был разбит на две части: трубы, для которых  $(D_r/S_r) < 13$  и более 13. Результаты расчетов приведены на рис. 6.14. Видно, что отношение  $D_3/D_r$  по-разному влияет на количество труб с наружными пленами: на относительно тонкостенных гильзах больший «подъем» диаметра благоприятно сказывается на качестве наружной поверхности, на толстостенных зависимость противоположная.

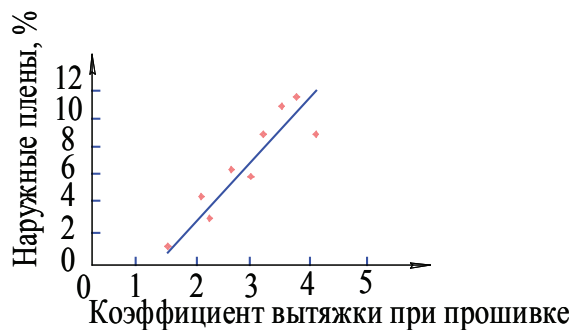


Рис. 6.13. Зависимость количества труб с наружными пленами от коэффициента вытяжки при прошивке

Таблица 6.15

**Влияние коэффициента вытяжки, отношения  $D_3/D_r$  и  $D_r/S_r$  на брак по наружной плене**

$D$ труб	$D_3/D_r$	$\mu$	$D_r/S_r$	Брак по нар. пл. %
140	0,974	2,14	7,9	17,5
146	0,962	3,27	13,1	6,0
152	0,92	3,29	14,5	5,0
159	0,893	3,21	15	7,5
	Среднее	3,02		
203	0,968	3,71	14,8	5,8
219	0,905	4,02	18,6	4,7

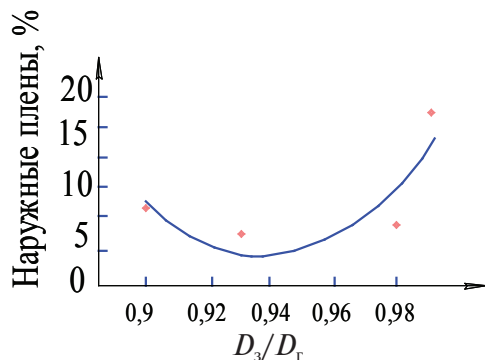


Рис. 6.14. Влияние отношения  $D_3/D_\Gamma$  на величину брака по плене на наружной поверхности труб, прокатанных из заготовок диаметром 150 мм

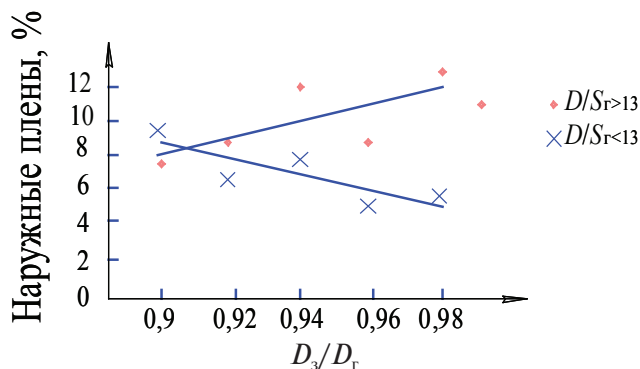


Рис. 6.15. Зависимость дефектности от отношения  $D_3/D_\Gamma$  на трубах с различным показателем тонкостенности  $D_\Gamma/S_\Gamma$  (сталь 20, ОХМК)

Если обратиться к данным табл. 6.15, где в двух последних строках приведены результаты прокатки труб из заготовки диаметром 210 мм, то видно, что гильзы обоих размеров по нашей классификации относятся к разряду «тонкостенных» и качество поверхности лучше при большем «подъеме». Если же принять во внимание данные табл. 6.14, то видно, что для ТПА 140 и ТПА 160 гильзы относятся к разряду толстостенных, для которых благоприятнее меньшая величина «подъема». В табл. 6.16 приведены обобщенные показатели несоответствий по наружным пленам (сталь 20) по двум заводам-поставщикам, технологии изготовления трубной заготовки на которых отличаются. Несмотря на то, что заготовка поставляется по одним техническим требованиям, различие в качестве труб, прокатанных из нее, довольно существенно. Рассмотрим влияние качества трубной заготовки и труб в зависимости от суммарного коэффициента вытяжки на ТПА. Заго-

товку диаметром 150 мм используют на ТПА 220 при прокатке труб диаметром 146, 152 и 159, на ТПА 160 — диаметром 121 мм и ТПА 30–102 при прокатке всех размеров. Проанализированы данные первичного контроля труб с этих установок. Марка стали — 20 поставки двух заводов — «Уральская сталь» (ОХМК) и Нижнетагильского меткомбината (НТМК). Вид несоответствий — наружные плены. В табл. 6.17 в двух последних столбцах указаны средние по выбранному сортаменту коэффициенты вытяжки на прошивном стане и суммарный (до готовой трубы) коэффициент вытяжки. Видно, что с увеличением суммарного коэффициента вытяжки и уменьшением коэффициента вытяжки на прошивном стане брак по наружным пленам уменьшается.

Таблица 6.16

**Обобщенные показатели несоответствий по наружным пленам (сталь 20)  
для двух поставщиков, %**

$D_{\text{заг.}}$	ОХМК	НТМК
120	13,3	3,77
130	7,03	4,63
140	8,48	8,66
150	8,63	6,11
160	10,4	8,24
170	6,95	
180	12,09	
190	14,03	
210	10,66	6,81
220	7,95	8,50
Итого	7,98	6,76

Таблица 6.17

**Количество наружных плен, % от предъявленного**

ТПА	ОХМК	НТМК	Коэффициент вытяжки при про- шивке	Суммарный коэффициент вытяжки
220	8,52 (284376)	6,17 (331000)	3,13	5,6
160	1,74 (13957)	0,15 (12644)	1,63	3,0
30–102	0,05 (7278000)	0,05 (14189000)	2,52	26,5

Резюмируя вышесказанное, отметим:

- в зависимости от типа трубопрокатного агрегата технологические процессы изготовления труб отличаются друг от друга:

- особенностями нагрева заготовки (различные типы нагревательных печей на разных ТПА);
- условиями прошивки, а именно: коэффициентами вытяжки на прошивном стане, применяемыми углами подачи, величиной тонкостенности гильз  $D_g/S_g$ , прокаткой с «подъемом» или с редуцированием по диаметру;
- суммарным коэффициентом вытяжки;
- сортаментом горячекатаных труб;
- преимущественным осуществлением деформации на станах винтовой или продольной прокатки;
- установлено, что на ТПА 220 процент бракованных труб по пленам на наружной поверхности зависит от технологии производства трубной заготовки у поставщика: «Уральская сталь» — 10,51 %; «СМЗ» — 9,22 %; «НТМК» — 7,36 %; «ОЭМК» — 4,17 %;
- причиной образования плен на наружной поверхности труб являются дефекты металлургического происхождения. Достоверным доказательством этого вывода является отсутствие поверхностных дефектов на трубах при использовании обточенной заготовки, вне зависимости от технологических условий производства на различных трубопрокатных агрегатах;
- применение огневой зачистки приводит к повышению уровня брака по наружной плене;
- изучение влияния глубины и ширины искусственных дефектов на поверхности заготовки позволило установить их минимальные значения (0,1 мм), при которых плены на наружной поверхности труб не образуются;
- условия прошивки трубной заготовки на ТПА 220, характеризующиеся высоким значением коэффициента вытяжки ( $\lambda = 3,13$ ) и большим значением отношения  $D_g/S_g$ , низкой величиной угла подачи ( $\beta = 7^\circ \dots 10,5^\circ$ ), способствует интенсивному формоизменению поверхностных дефектов металлургического происхождения и образованию плен на наружной поверхности горячекатаных труб;
- интенсивное окалинообразование в секционной нагревательной печи ТПА 30–102 приводит к уменьшению глубины исходных поверхностных дефектов на трубной заготовке, а высокое значение суммарного коэффициента вытяжки на раскатном и редуцирующем стане способствует уменьшению глубины дефектов, или их выкату, следовательно, к уменьшению брака по наружным пленам.



## Список библиографических ссылок

---

1. Peter Heimerzheim Dr., Olaf Szebsdat. Прошивные косовалковые станы. Качество с самого начала // SMS MEER. Corporate Communications. Германия. 2012. — № 3. — С. 8–9.
2. Krahn Dr. Прошивка на косовалковом стане — основы и технология // SMS MEER. Германия. 2007. — 48 с.
3. Технология и оборудование трубного производства / В. Я. Осадчий, А. С. Вавилин, В. Г. Зимовец, А. П. Коликов ; под ред. В. Я. Осадчего. — М. : Интермет Инжиниринг, 2007. — 560 с.
4. Потапов И. Н., Коликов А. П. Теория трубного производства. — М. : Металлургия, 1991. — 424 с.
5. Горячая прокатка и прессование труб / Ф. А. Данилов [и др.]. — М. : Металлургия, 1972. — 576 с.
6. Тетерин П. К. Теория поперечной и винтовой прокатки. — М. : Металлургия, 1983. — 270 с.
7. Технология трубного производства: учебник для вузов / В. Н. Данченко, А. П. Коликов, Б. А. Романцев, Св. Самусев. — М. : Интермет Инжиниринг, 2002. — 640 с.
8. Обработка металлов давлением / Б. А. Романцев, А. В. Гончарук, Н. М. Вавилкин, С. В. Самусев. — М. : Изд. Дом МИСиС, 2008. — 960 с.
9. Потапов И. Н., Полухин П. И. Технология винтовой прокатки. 2-е изд., доп. и перераб. — М. : Металлургия, 1990. — 344 с.
10. Швейкин В. В. Основы винтовой прокатки труб : учеб. пособие. — Свердловск : УПИ, 1986. — 88 с.

*Учебное издание*

**Богатов Александр Александрович**  
**Павлов Дмитрий Андреевич**  
**Нухов Данис Шамильевич**

**ВИНТОВАЯ ПРОКАТКА  
НЕПРЕРЫВНО-ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК  
ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАРОК СТАЛИ**

Редактор Н. П. Кубыщенко  
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 27.02.2017. Формат 70×100/16.  
Бумага писчая. Печать цифровая. Гарнитура Newton.  
Уч.-изд. л. 8,6. Усл. печ. л. 13,2. Тираж 50 экз.  
Заказ 46

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8(343)375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8(343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс: 8(343) 358-93-06  
E-mail: press-urfu@mail.ru





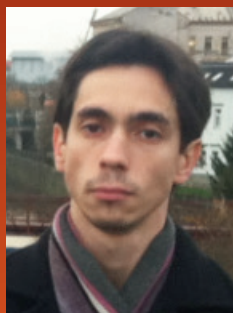
### **БОГАТОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением», известный специалист в области механики обработки металлов давлением и механики разрушения металлов. Под его руководством созданы новые методики и уникальное оборудование для исследования диаграммы пластичности и разрушения металлов, реологических свойств технологических смазок. Основные научно-технические разработки защищены авторскими свидетельствами СССР и патентами России и внедрены на металлургических и машиностроительных предприятиях страны.



### **ПАВЛОВ ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Обработка металлов давлением». Научная деятельность Д. А. Павлова направлена на совершенствование технологии обжатия заготовки на стане винтовой прокатки, процессов продольной прокатки труб на раскатном и редуционном станах с использованием компьютерного моделирования. Научно-технические результаты его работы опубликованы в ведущих зарубежных и российских журналах и защищены патентами на изобретение.



### **НУХОВ ДАНИС ШАМИЛЬЕВИЧ**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Обработка металлов давлением». Его научные интересы: исследование инновационных процессов обработки металлов давлением, основанных на интенсивной знакопеременной деформации, а также процессов винтовой прокатки трубных заготовок из конструкционных марок стали.